

(54) [Title of the Invention] Optical Characteristic Measuring Method and Device, Signal Sensitivity Setting Method, Exposure Apparatus, and Device Manufacturing Method

(57) [Abstract]

[Problem] To accurately measure the best focus position of a projection optical system regardless of the type of measurement mark.

[Solution] A predetermined measurement mark is illuminated with illumination light to form an aerial image of the measurement mark on an image plane through the projection optical system. Then, a measurement pattern is scanned relative to the aerial image while photoelectrically converted signals corresponding to the intensity of illumination light through the measurement pattern are obtained at each of a plurality of positions of the measurement pattern in an optical axis direction. Then, an area surrounded by photoelectrically converted signals obtained at respective positions of the measurement pattern in the optical axis direction, for example, a waveform of signals  $P_1$  and  $P_2$ , and the scan axis of the measurement pattern is divided into a first area A (surface area A) indicating that the projection optical system is near the best focus position and a second area B (surface area B) indicating that it is far from the best focus position to detect the best focus position using an area ratio  $A/B$  between the first area and the second area as an evaluation

amount.

[Scope of Patent for Claims]

[Claim 1] An optical characteristic measuring method for measuring optical characteristics of a projection optical system, comprising:

a step of illuminating a predetermined measurement mark with illumination light to form an aerial image of the measurement mark on an image plane through the projection optical system; a step of scanning a measurement pattern arranged on the image plane side of the projection optical system relative to the aerial image while obtaining photoelectrically converted signals corresponding to the intensity of illumination light through the measurement pattern at each of a plurality of positions of the measurement pattern in an optical axis direction; and a step of dividing an area surrounded by a waveform of the photoelectrically converted signals obtained at respective positions of the measurement pattern in the optical axis direction and a scan axis of the measurement pattern into a first area indicating that the projection optical system is near a best focus position and a second area indicating that it is far from the best focus position to detect the best focus position using an area ratio between the first area and the second area as an evaluation amount.

[Claim 2] The optical characteristic measuring method according to claim 1 wherein

the photoelectrically converted signals are image

intensity signals representing the intensity of the aerial image corresponding to respective positions of the measurement pattern,

the first area is an area having a predetermined width including a design best focus position when an area corresponding to the image intensity signals is divided along the position direction, and

the second area is an area remaining after being divided.

[Claim 3] The optical characteristic measuring method according to claim 1 wherein

the photoelectrically converted signals are image intensity signals representing the intensity of the aerial image corresponding to respective positions of the measurement pattern,

the first area is an area close to a maximum intensity side when an area corresponding to the image intensity signals is divided by a predetermined image intensity threshold along an intensity direction, and

the second area is an area remaining after being divided.

[Claim 4] The optical characteristic measuring method according to any one of claims 1 to 3 further comprising a step of repeating detection of the best focus position at a plurality of points different in distance from the optical axis of the projection optical system to detect an image plane shape of the projection optical system.

[Claim 5] The optical characteristic measuring method according to any one of claims 1 to 4 wherein the measurement mark is an isolated line-shaped pattern consisting of at least one line pattern elongated in a direction orthogonal to the scanning direction.

[Claim 6] The optical characteristic measuring method according to any one of claims 1 to 5 wherein the measurement pattern is a slit-shaped aperture pattern having a predetermined width elongated in a direction orthogonal to the scanning direction in a two-dimensional plane perpendicular to the optical axis.

[Claim 7] The optical characteristic measuring method according to any one of claims 1 to 6 wherein a signal processing system including a photoelectric conversion device outputting photoelectrically converted signals according to the intensity of received signal light and a processing circuit into which the photoelectrically converted signals are input from the photoelectric conversion device is used to acquire the photoelectrically converted signals, and based on a value obtained by dividing an integrated value of one peak of the photoelectrically converted signals by larger one of the line width of the measurement mark and the width of the measurement pattern, the signal sensitivity of the signal processing system is so set that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made.

[Claim 8] A signal sensitivity setting method for setting a signal sensitivity of a signal processing system including a photoelectric conversion device outputting photoelectrically converted signals according to intensity of received signal light and a processing circuit into which the photoelectrically converted signals are input from the photoelectric conversion device, the method comprising:

a step of irradiating illumination light onto a second surface through a linear pattern having a predetermined line width elongated in a first direction on a first surface; a step of scanning a measurement pattern, having a predetermined width elongated in the first direction on the second surface, with respect to the illumination light along a second direction orthogonal to the first direction while receiving the illumination light through the measurement pattern on the photoelectric conversion device to convert it into photoelectrically converted signals according to the intensity of received light; and a step of setting the signal sensitivity of the signal processing system based on an integrated value of the photoelectrically converted signals so that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made.

[Claim 9] The signal sensitivity setting method according to claim 8 wherein the signal sensitivity is set in the setting step based on a value obtained by dividing an

integrated value of a one-peak waveform of the photoelectrically converted signals by larger one of the line width of the linear pattern and the width of the measurement pattern.

[Claim 10] The signal sensitivity setting method according to claim 8 or 9 wherein the photoelectric conversion device is a photomultiplier tube, and

the signal sensitivity is set by setting a voltage applied to the photomultiplier tube.

[Claim 11] An optical characteristic measuring device for measuring optical characteristics of a projection optical system, comprising:

an illumination device for illuminating a predetermined measurement mark to form an aerial image of the measurement mark on an image plane through the projection optical system; a pattern forming member arranged on the image plane side of the projection optical system and having a measurement pattern formed thereon; a photoelectric conversion device outputting photoelectrically converted signals according to the intensity of illumination light through the measurement pattern; a measurement processing device for scanning the pattern forming member to scan the measurement pattern relative to the aerial image formed on the image plane when the illumination device illuminates the measurement mark while measuring a light intensity distribution corresponding to the aerial image at each of a plurality of

positions of the pattern forming member in an optical axis direction based on the photoelectrically converted signals from the photoelectric conversion device; and calculation device for dividing an area surrounded by a waveform of the photoelectrically converted signals, obtained at respective positions of the pattern forming member in the optical axis direction as a result of measurement by the measurement processing device, and a scan axis of the pattern forming member into a first area indicating that the projection optical system is near a best focus position and a second area indicating that it is far from the best focus position to calculate the best focus position using an area ratio between the first area and the second area as an evaluation amount.

[Claim 12] The optical characteristic measuring device according to claim 11 wherein the measurement mark is an isolated line-shaped pattern consisting of at least one line pattern elongated in a direction orthogonal to the scanning direction.

[Claim 13] The optical characteristic measuring device according to claim 11 or 12 wherein the measurement pattern is a slit-shaped aperture pattern having a predetermined width elongated in a direction orthogonal to the scanning direction in a two-dimensional plane perpendicular to the optical axis.

[Claim 14] The optical characteristic measuring device according to any one of claims 11 to 13 further comprising

signal processing circuit into which the photoelectrically converted signals are input from the photoelectric conversion device, the signal processing circuit and the photoelectric conversion device constituting a signal processing system, wherein

the measurement processing device comprises a signal sensitivity setting device for setting a signal sensitivity of the signal processing system, and

upon measuring a light intensity distribution corresponding to the aerial image based on the photoelectrically converted signals, the signal sensitivity setting device sets the signal sensitivity of the signal processing system based on an integrated value of the photoelectrically converted signals so that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made.

[Claim 15] The optical characteristic measuring device according to claim 14 wherein the signal sensitivity setting device sets the signal sensitivity based on a value obtained by dividing the integrated value of one peak of the photoelectrically converted signals by larger one of the line width of the measurement mark and the width of the measurement pattern.

[Claim 16] The optical characteristic measuring device according to claim 14 or 15 wherein the photoelectric conversion device is a photomultiplier tube, and

the signal sensitivity setting device sets the signal



sensitivity by setting a voltage applied to the photomultiplier tube.

[Claim 17] An exposure apparatus for transferring a circuit pattern formed on a mask to a substrate through a projection optical system, comprising:

a substrate stage for moving the substrate while holding it; and the optical characteristic measuring device according to any one of claims 11 to 16 wherein the pattern forming member is integrally formed with the substrate stage.

[Claim 18] A device manufacturing method including a lithographic process in which the exposure apparatus according to claim 17 is used for exposure.

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] The present invention relates to an optical characteristic measuring method and device, a signal sensitivity setting method, an exposure apparatus, and a device manufacturing method. More particularly, the present invention relates to an optical characteristic measuring method for a projection optical system for forming a predetermined pattern of aerial image on an image plane and an optical characteristic measuring device for implementing the optical characteristic measuring method, a signal sensitivity setting method for a signal processing system used to measure the aerial image in the optical characteristic measuring method, an exposure apparatus

provided with the optical characteristic measuring device, and a device manufacturing method using the exposure apparatus.

[0002]

[Prior Art] Conventionally, in manufacturing semiconductor devices, liquid crystal display devices, or the like in a photolithographic process, a projection exposure apparatus such as, for example, a step-and-repeat type reduction-projection exposure apparatus (a so-called stepper), a step-and-scan type scanning projection exposure apparatus (a so-called scanning stepper), or the like is used to transfer a pattern of a photomask or reticle (hereinafter generically referred to as "reticle") through a projection optical system onto a substrate, such as a wafer or a glass plate, the surface of which is coated with a photosensitive material such as a photoresist.

[0003] When a semiconductor device or the like is manufactured, since many layers of different circuit patterns need to be formed one upon another on the substrate, it is important to accurately align the reticle having a circuit pattern written thereon with a pattern already formed in each shot area on the substrate. In order to perform the alignment accurately, it is indispensable to adjust optical characteristics (including imaging characteristics) of the projection optical system to achieve desired conditions.

[0004] As a precondition to adjusting the optical

characteristics of the projection optical system, it is necessary to accurately measure the optical characteristics. As one of methods for measuring the optical characteristics, there is a method in which a measurement mask with a measurement mark formed thereon is illuminated with illumination light to scan a rectangular or slit-shaped aperture pattern relative to the aerial image (projected image) of the measurement mark formed through the projection optical system without performing actual exposure. Then, the light that passed through the aperture pattern is photoelectrically converted to measure the aerial image and calculate the optical characteristics based on the measurement results (hereinafter referred to as "aerial image measuring method").

[0005] In the aerial image measuring method, not only horizontal aberration such as distortion (including magnification distortion) and coma aberration of the projection optical system but also vertical aberration such as the best focus position, field curvature, and spherical aberration can be measured.

[0006]

[Problem to be Solved by the Invention] In the conventional aerial image measuring method, when measuring the best focus position of the projection optical system, light intensity signals corresponding to the aerial image are Fourier transformed to use an evaluation amount based on, for example, the amplitude of fundamental wave components

such as contrast indicative of a ratio between the amplitude of a first-order frequency component and the amplitude of a zero-order frequency component. Therefore, a repetitive mark with a relatively narrow pitch suitable for detecting the fundamental waveforms is used as a measurement mark for the best focus position, such as, for example, a line-and-space mark with 1:1 duty ratio as a ratio between the line width and the space width. The measurement of the best focus position using such a line-and-space mark can be suitably used in manufacturing memories such as DRAMs.

[0007] However, since semiconductor exposure apparatuses are also used in manufacturing CPUs, system LSIs, etc. as well as memories, new techniques capable of measuring the best focus position of the projection optical system by getting a shot at an isolated line or a repetitive mark with a relatively wide repetition pitch is being expected from those manufacturers, for example, from CPU manufacturers.

[0008] This is because, although the best focus position of the projection optical system differs between use of a repetitive mark with a relatively narrow pitch and use of an isolated line or a repetitive mark (a quasi-isolated line) with a relatively wide pitch as the measurement mark, the latter is difficult to measure in the technique using the above-mentioned evaluation amount based on the amplitude of the fundamental wave components.

[0009] The present invention has been made under the above circumstances, and it is a first object thereof to provide an optical characteristic measuring method and device capable of accurately measuring the best focus position of a projection optical system regardless of the type of measurement mark.

[0010] It is a second object of the present invention to provide a signal sensitivity setting method capable of accurately measuring a light intensity distribution by making the most effective use of the resolution of a signal processing system.

[0011] It is a third object of the present invention to provide an exposure apparatus for achieving precise exposure by preventing poor exposure due to defocus.

[0012] It is a fourth object of the present invention to provide a device manufacturing method capable of improving device productivity.

[0013]

[Means for Solving the Problem] An optical characteristic measuring method according to claim 1 is to measure the optical characteristics of a projection optical system (PL). The optical characteristic measuring method comprises: a step of illuminating a predetermined measurement mark (PM) with illumination light (IL) to form an aerial image (PM') of the measurement mark on an image plane through the projection optical system; a step of scanning a measurement pattern (22), arranged on the image plane side of the

projection optical system, relative to the aerial image while obtaining photoelectrically converted signals corresponding to the intensity of illumination light through the measurement pattern at each of a plurality of positions of the measurement pattern in an optical axis direction; and a step of dividing an area surrounded by a waveform of the photoelectrically converted signals obtained at respective positions of the measurement pattern in the optical axis direction and a scan axis of the measurement pattern into a first area indicating that the projection optical system is near the best focus position and a second area indicating that it is far from the best focus position to detect the best focus position using an area ratio between the first area and the second area as an evaluation amount.

[0014] According to this method, the predetermined measurement mark is illuminated with the illumination light to form the aerial image of the measurement mark on the image plane through the projection optical system, and the measurement pattern is scanned relative to the aerial image while obtaining the photoelectrically converted signals corresponding to the intensity of illumination light through the measurement pattern at each of the plurality of positions of the measurement pattern in the optical axis direction. Then, the area surrounded by the waveform of the photoelectrically converted signals obtained at respective positions of the measurement pattern in the optical axis

direction and the scan axis of the measurement pattern is divided into the first area indicating that the projection optical system is near the best focus position and the second area indicating that it is far from the best focus position to detect the best focus position using the area ratio between the first area and the second area as the evaluation amount. Therefore, without Fourier transform or the like of intensity signals (photoelectrically converted signals) of the aerial image, the area surrounded by the waveform of the photoelectrically converted signals and the scan axis of the measurement pattern is just divided into two areas by predetermined criteria so that the best focus position of the projection optical system can be measured accurately from the area ratio between the two areas regardless of the type of measurement mark.

[0015] In this case, various methods of setting the first area and the second area are considered. For example, as in the optical characteristic measuring method according to claim 2, when the photoelectrically converted signals are image intensity signals representing the intensity of the aerial image corresponding to respective positions of the measurement pattern, the first area can be set as an area having a predetermined width including a design best focus position when an area corresponding to the image intensity signals is divided along the position direction, and the second area can be set as an area remaining after being divided. Alternatively, as in the optical characteristic

measuring method according to claim 3, when the photoelectrically converted signals are image intensity signals representing the intensity of the aerial image corresponding to respective positions of the measurement pattern, the first area can be set as an area close to a maximum intensity side when the area corresponding to the image intensity signals is divided by a predetermined image intensity threshold along an intensity direction, and the second area can be set as an area remaining after being divided.

[0016] As in the optical characteristic measuring method according to claim 4, the optical characteristic measuring method according to each of claims 1 to 3 can further comprise a step of repeating detection of the best focus position at a plurality of points different in distance from the optical axis of the projection optical system to detect an image plane shape of the projection optical system.

[0017] In the optical characteristic measuring method according to each of claims 1 to 4, the measurement mark can be, of course, a line-and-space mark with a short repetition pitch or interval. Alternatively, as in the optical characteristic measuring method according to claim 5, the measurement mark can also be an isolated line-shaped pattern consisting of at least one line pattern elongated in a direction orthogonal to the scanning direction. Here, the term "isolated line-shaped pattern" includes, in



addition to an isolated line pattern, a so-called quasi-isolated line pattern as a line-and-space mark having a duty ratio of 1:9 (or more) as a ratio between the line width and the space width. This term "isolated line-shaped pattern" is used appropriately below in the same sense in this specification.

[0018] In the optical characteristic measuring method according to each of claims claim 1 to 5, the measurement pattern can be a rectangular aperture pattern.

Alternatively, for example, as in the optical characteristic measuring method according to claim 6, the measurement pattern can be a slit-shaped aperture pattern having a predetermined width elongated in a direction orthogonal to the scanning direction in a two-dimensional plane perpendicular to the optical axis.

[0019] As in the optical characteristic measuring method according to claim 7, the optical characteristic measuring method according to each of claims 1 to 6 can be configured such that a signal processing system including a photoelectric conversion device outputting photoelectrically converted signals according to the intensity of received signal light and a processing circuit into which the photoelectrically converted signals are input from the photoelectric conversion device is used to acquire the photoelectrically converted signals, and based on a value obtained by dividing an integrated value of one peak of the photoelectrically converted signals by larger

one of the line width of the measurement mark and the width of the measurement pattern, the signal sensitivity of the signal processing system is so set that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made.

[0020] A signal sensitivity setting method according to claim 8 is to set the signal sensitivity of a signal processing system (50) including a photoelectric conversion device (24) outputting photoelectrically converted signals according to the intensity of received signal light and a signal processing circuit (42) into which the photoelectrically converted signals are input from the photoelectric conversion device. The signal sensitivity setting method comprises: a step of irradiating illumination light onto a second surface through a linear pattern having a predetermined line width elongated in a first direction on a first surface; a step of scanning a measurement pattern, having a predetermined width elongated in the first direction on the second surface, with respect to the illumination light along a second direction orthogonal to the first direction while receiving the illumination light through the measurement pattern on the photoelectric conversion device to convert it into photoelectrically converted signals according to the light intensity; and a step of setting the signal sensitivity of the signal processing system based on an integrated value of the photoelectrically converted signals so that the most

effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made.

[0021] According to this method, the illumination light is irradiated onto the second surface through the linear pattern having the predetermined line width elongated in the first direction on the first surface. Then, the measurement pattern having the predetermined width elongated in the first direction on the second surface is scanned with respect to the illumination light along the second direction orthogonal to the first direction while the illumination light through the measurement pattern is received on the photoelectric conversion device to convert it into the photoelectrically converted signals according to the intensity of received light. Then, based on the integrated value of the photoelectrically converted signals, the signal sensitivity of the signal processing system is so set that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made. Thus, since the signal sensitivity is so set that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made, an intensity distribution of illumination light can be measured at a high resolution. Here, in case of use of a projection optical system for projecting, onto the second surface, illumination light irradiated through the linear pattern, since the measurement pattern is scanned with respect to the illumination light along the second direction to cause the photoelectric conversion device to

output the photoelectrically converted signals according to the intensity of an aerial image of the linear pattern, the aerial image can be measured accurately at a high resolution.

[0022] In this case, as in the signal sensitivity setting method according to claim 9, the signal sensitivity can be set in the setting step based on a value obtained by dividing an integrated value of a one-peak waveform of the photoelectrically converted signals by larger one of the line width of the linear pattern and the width of the measurement pattern. Here, the one-peak waveform of the photoelectrically converted signals corresponds, for example, to signals obtained from one linear pattern.

[0023] As in the signal sensitivity setting method according to claim 10, the signal sensitivity setting method according to each of claims 8 and 9 can be configured such that the photoelectric conversion device is a photomultiplier tube, and the signal sensitivity is set by setting a voltage applied to the photomultiplier tube.

[0024] An optical characteristic measuring device according to claim 11 is to measure the optical characteristics of a projection optical system (PL). This optical characteristic measuring device comprises: an illumination device (10) for illuminating a predetermined measurement mark (PM) to form an aerial image (PM') of the measurement mark on an image plane through the projection optical system; a pattern forming member (90) arranged on the image plane side of the

projection optical system and having a measurement pattern (22) formed thereon; a photoelectric conversion device (24) outputting photoelectrically converted signals according to the intensity of illumination light through the measurement pattern; a measurement processing device (20) for scanning the pattern forming member to scan the measurement pattern relative to the aerial image formed on the image plane when the illumination device illuminates the measurement mark while measuring a light intensity distribution corresponding to the aerial image at each of a plurality of positions of the pattern forming member in an optical axis direction based on the photoelectrically converted signals from the photoelectric conversion device; and calculation device (20) for dividing an area surrounded by a waveform of the photoelectrically converted signals, obtained at respective positions of the pattern forming member in the optical axis direction as a result of measurement by the measurement processing device, and a scan axis of the pattern forming member into a first area indicating that the projection optical system is near a best focus position and a second area indicating that it is far from the best focus position to calculate the best focus position using an area ratio between the first area and the second area as an evaluation amount.

[0025] According to this device, the measurement mark is illuminated by the illumination device to form the aerial image of the measurement mark on the image plane through

the projection optical system. Under this condition, the measurement processing device scans the pattern forming member to scan the measurement pattern relative to the aerial image while measuring the light intensity distribution corresponding to the aerial image at each of the plurality of positions of the pattern forming member in the optical axis direction based on the photoelectrically converted signals from the photoelectric conversion device. Then, the calculation device divides the area surrounded by the waveform of the photoelectrically converted signals, obtained at respective positions of the pattern forming member in the optical axis direction as a result of measurement by the measurement processing device, and the scan axis of the pattern forming member into the first area indicating that the projection optical system is near the best focus position and the second area indicating that it is far from the best focus position to calculate the best focus position using the area ratio between the first area and the second area as the evaluation amount. Therefore, without Fourier transform or the like of intensity signals (photoelectrically converted signals) of the aerial image, the area surrounded by the waveform of the photoelectrically converted signals and the scan axis of the measurement pattern is just divided into two areas by predetermined criteria so that the best focus position of the projection optical system can be measured accurately from the area ratio between the two areas regardless of the

type of measurement mark.

[0026] In this case, as in the optical characteristic measuring device according to claim 12, the measurement mark can be an isolated line-shaped pattern consisting of at least one line pattern elongated in a direction orthogonal to the scanning direction.

[0027] As in the optical characteristic measuring device according to claim 13, the optical characteristic measuring device according to each of claims 11 and 12 can be configured such that the measurement pattern is a slit-shaped aperture pattern having a predetermined width elongated in a direction orthogonal to the scanning direction in a two-dimensional plane perpendicular to the optical axis.

[0028] As in the optical characteristic measuring device according to claim 14, the optical characteristic measuring device according to each of claims 11 to 13 can further comprise a signal processing circuit (42) into which the photoelectrically converted signals are input from the photoelectric conversion device, the signal processing circuit and the photoelectric conversion device constituting a signal processing system (50), wherein the measurement processing device comprises a signal sensitivity setting device (20) for setting the signal sensitivity of the signal processing system, and when measuring a light intensity distribution corresponding to the aerial image based on the photoelectrically converted

signals, the signal sensitivity setting device sets the signal sensitivity of the signal processing system based on an integrated value of the photoelectrically converted signals so that the most effective use of the dynamic range of the signal processing system can be made.

[0029] In this case, as in the optical characteristic measuring device according to claim 15, the signal sensitivity setting device can set the signal sensitivity based on a value obtained by dividing the integrated value of one peak of the photoelectrically converted signals by larger one of the line width of the measurement mark and the width of the measurement pattern.

[0030] As in claim 16, the optical characteristic measuring device according to each of claims 14 and 15 can be configured such that, when the photoelectric conversion device is a photomultiplier tube, the signal sensitivity setting device sets the signal sensitivity by setting a voltage applied to the photomultiplier tube.

[0031] An exposure apparatus according to claim 17 is to transfer a circuit pattern formed on a mask (R) onto a substrate (W) through a projection optical system (PL). The exposure apparatus comprises: a substrate stage (WST) for moving the substrate while holding it; and the optical characteristic measuring device according to any one of claims 11 to 16 wherein the pattern forming member (90) is integrally formed with the substrate stage.

[0032] According to this structure, since the exposure



apparatus comprises the optical characteristic measuring device according to any one of claims 11 to 16 wherein the pattern forming member is integrally formed with the substrate stage, the optical characteristic measuring device can accurately measure the best focus position of the projection optical system. Then, based on the measurement result of the best focus position, the mask and the substrate can be aligned in a desired optical position relationship, and this can prevent poor exposure due to defocus and hence achieve precise exposure.

[0033] A device manufacturing method according to claim 18 includes a lithographic process in which the exposure apparatus according to claim 17 is used for exposure.

[0034]

[Embodiment of the Invention] A preferred embodiment of the present invention will now be described with reference to FIGS. 1 through 11. FIG. 1 illustrates the schematic structure of an exposure apparatus 100 according to the embodiment. This exposure apparatus 100 is a step-and-scan type scanning projection exposure apparatus, that is, a so-called scanning stepper.

[0035] This exposure apparatus 100 is equipped with an illumination system 10 as an illumination device including a light source and an illumination optical system, a reticle stage RST for holding a reticle R as a mask, a projection optical system PL, a wafer stage WST for holding a wafer W as a substrate movably in an XY plane, a control

system for controlling these components, etc.

[0036] The illumination system 10 includes (though not shown in FIG. 1) the light source, an illumination uniformizing optical system (consisting of a collimator lens, a fly-eye lens, etc.), a relay lens system, a reticle blind as an illumination field stop, a condenser lens system, etc.

[0037] Here, it is assumed that an excimer laser light source outputting KrF excimer laser light (248 nm wavelength) or ArF excimer laser light (193 nm wavelength) is used as an example of the light source.

[0038] The reticle blind is composed of a fixed reticle blind with a fixed aperture shape, not shown, and a movable reticle blind 12 with a variable aperture shape (not shown in FIG. 1, see FIG. 2). The fixed reticle blind is placed on a plane slightly out of focus from a pattern plane of the reticle R or its conjugate plane, and a rectangular aperture is formed in the fixed reticle blind to define a rectangular slit-shaped illumination area IAR on the reticle R (which is elongated in an X-axis direction corresponding to a direction orthogonal to the paper surface of FIG. 1 and has a predetermined width in an Y-axis direction corresponding to a lateral direction in the paper surface of FIG. 1). On the other hand, the movable reticle blind 12 is placed on a conjugate plane with the pattern plane of the reticle R and has an aperture varying in directional position and width in both a scanning

direction (which is assumed here to be the Y-axis direction) upon scanning exposure and a non-scanning direction (which is assumed to be the X-axis direction), respectively. Note that the movable reticle blind 12 is illustrated to be placed near the illumination system side with respect to the reticle R for the sake of simplicity.

[0039] In the illumination system 10, illumination light generated by the light source as exposure light (hereinafter referred to as "illumination light IL") passes through a shutter, not shown, and is converted by the illumination uniformizing optical system to a flux of light having a substantially uniform illumination distribution. The illumination light IL shot from the illumination uniformizing optical system reaches the reticle blind through the relay lens system. The flux of light that passed through the reticle blind passes through the relay lens system and the condenser lens system to uniformly illuminate the illumination area IAR of the reticle R in which a circuit pattern or the like is written.

[0040] The movable reticle blind 12 is controlled by a main controller 20 at the beginning and end of scanning exposure to further limit the illumination area IAR in order to prevent exposure to unnecessary areas. In the embodiment, the movable reticle blind 12 is also used to set an illumination area upon measurement of an aerial image with an aerial image measuring device to be described later.

[0041] The reticle R is held on the reticle stage RST, for

example, by vacuum suction (or electrostatic suction). Here, the reticle stage RST can be not only finely driven by a reticle stage driving system including a linear motor or the like, not shown, two-dimensionally in an XY plane orthogonal to the optical axis AX of the projection optical system PL (in the X-axis direction, Y-axis direction, and a rotation direction about a Z axis ( $\theta_z$  direction) orthogonal to the XY plane) to be described later, but also moved in the Y-axis direction on a reticlebase, not shown, at a specified scanning speed. This reticle stage RST has a moving stroke in the Y-axis direction long enough to make it possible to move the whole area of the reticle R across at least the optical axis AX of the projection optical system PL.

[0042] A moving mirror 15 reflecting a laser beam from a reticle laser interferometer (hereinafter referred to as "reticle interferometer") 13 is fixed on the reticle stage RST so that the reticle interferometer 13 will detect on a steady basis the position of the reticle stage RST (including the  $\theta_z$  direction as the rotation direction about the X axis) in the XY plane at a resolution of, for example, about 0.5 to 1 nm. In practice, although a moving mirror having a reflecting surface orthogonal to the scanning direction (Y-axis direction) upon scanning exposure and a moving mirror having a reflecting surface orthogonal to the non-scanning direction (X-axis direction) are provided on the reticle stage RST, and reticle interferometers 13 are

provided for at least two axes in the Y-axis direction and at least one axis in the X-axis direction, these are represented by the moving mirror 15 and the reticle interferometer 13 in FIG. 1.

[0043] Position information of the reticle stage RST from the reticle interferometer 13 is sent to the main controller 20 composed of a workstation (or microcomputer). The main controller 20 controls driving of the reticle stage RST through the reticle stage driving system based on the position information of the reticle stage RST.

[0044] The projection optical system PL is arranged below the reticle stage RST in FIG. 1 in which the direction of its optical axis AX is set to the Z-axis direction. Here, a both-side telecentric reduction optical system is used, which is a dioptric or refracting optical system consisting of a plurality of lens elements arranged at predetermined intervals along the direction of the optical axis AX. Here, as an example, this projection optical system PL has a projection magnification of  $1/5$ . Therefore, when the slit-shaped illumination area IAR on the reticle R is illuminated with the illumination light IL from the illumination system 10, the illumination light IL passes through the reticle R and the projection optical system PL so that a reduced image (partially inverted image) of the circuit pattern in the slit-shaped illumination area IAR of the reticle R will be formed in an exposure area IA, conjugate with the illumination area IAR, on a wafer W the

surface of which is coated with a photoresist.

[0045] The wafer stage WST is driven by a wafer stage driving system, not shown, composed, for example, of magnetic levitation type two-dimensional linear actuators, so that it can move freely within the two-dimensional XY plane (including the  $\theta_z$  rotation). Here, since the two-dimensional linear actuators have a Z driving coil as well as an X driving coil and a Y driving coil, the wafer stage WST is configured to have three degrees of freedom to make small movements in the Z,  $\theta_x$  (rotation direction about the X axis), and  $\theta_y$  (rotation direction about the Y axis) directions.

[0046] A wafer holder 25 is mounted on the wafer stage WST to hold the wafer W by vacuum suction (or electrostatic suction).

[0047] If a two-dimensional moving stage driven within the two-dimensional plane alone by a driving system such as a linear motor or a planar motor is used instead of the wafer stage WST, the wafer holder 25 has only to be mounted on the two-dimensional stage through a Z leveling table minutely driven by, for example, a voice coil motor or the like, in the directions Z,  $\theta_x$ , and  $\theta_y$  with the three degrees of freedom.

[0048] A moving mirror 27 reflecting a laser beam from a wafer laser interferometer (hereinafter referred to as "wafer interferometer") 31 is fixed on the wafer stage WST, so that the position of wafer stage WST in directions with

the five degrees of freedom except in the Z direction of the wafer stage WST (that is, in the X, Y,  $\theta_z$ ,  $\theta_x$ , and  $\theta_y$  directions) is detected on a steady basis by the wafer interferometer 31 arranged outside of the wafer stage WST at a resolution of, for example, about 0.5 to 1 nm.

[0049] In practice, although a moving mirror having a reflecting surface orthogonal to the Y-axis direction as the scanning direction upon scanning exposure and a moving mirror having a reflecting surface orthogonal to the X-axis direction as the non-scanning direction are provided on the wafer stage WST, and plural wafer interferometers 31 are provided in the Y-axis and X-axis directions, respectively, these are represented by the moving mirror 27 and the wafer interferometer 31 in FIG. 1. Position information (or speed information) of the wafer stage WST is sent to the main controller 20. The main controller 20 controls the position of the wafer stage WST within the XY plane through the wafer stage driving system, not shown, based on the position information (or speed information).

[0050] Further, part of an optical system constituting an aerial image measuring device used in measuring the optical characteristics of the projection optical system PL is arranged inside the wafer stage WST. The following describes the structure of an aerial image measuring device 59 in detail. As shown in FIG. 2, this aerial image measuring device 59 includes stage-side components provided in the wafer stage WST, that is, a slit plate 90 as a

pattern forming member, a relay optical system consisting of lenses 84 and 86, a mirror 88 for bending the optical path, and a light-sending lens 87. The aerial image measuring device 59 also includes external components arranged outside of the wafer stage WST, that is, a mirror M, a light-receiving lens 89, an optical sensor 24 as a photoelectric conversion device, and a signal processing circuit 42 for photoelectrically converted signals from the optical sensor 24.

[0051] To be more specific, as shown in FIG. 2, the slit plate 90 is fitted in a protruding portion 58a, open at the top and provided at one end on the upper surface of the wafer stage WST, so that it will plug the opening. This slit plate 90 is formed by patterning a slit-shaped aperture pattern (hereinafter referred to as "slit") 22 with a predetermined width (2D) as a measurement pattern in a portion of a reflection film 83. The reflection film serving also as a light shielding film is formed on the upper surface of a light-receiving glass 82 having a rectangular shape in a plan view.

[0052] Here, as the material of the light-receiving glass 82, a synthetic quartz or fluorite material having a good transmittance to KrF or ArF excimer laser light is used.

[0053] The relay optical system (84, 86) consisting of the lenses 84 and 86 is arranged inside the wafer stage WST below the slit 22 through the mirror 88 for horizontally bending the optical path of the illumination flux of light



(image flux) incident vertically downward through the slit 22. The light-sending lens 87 for sending the flux of illumination light, which is relayed by a predetermined optical path length through the relay optical system (84, 86), to the outside of the wafer stage WST is fixed on a side wall on the +Y side of the wafer stage WST located behind the optical path of the relay optical system (84, 86).

[0054] A mirror M having a predetermined length in the X-axis direction is provided at an inclination angle of 45 degrees in the optical path of the illumination light flux sent by the light-sending lens 87 to the outside of the wafer stage WST. This mirror M is to bend the optical path of the illumination light flux sent to the outside of the wafer stage WST at an angle of 90 degrees upward in the vertical direction. A light-receiving lens 89 larger in diameter than the light-sending lens 87 is arranged in the optical path of the bent light flux. The optical sensor 24 is placed above the light-receiving lens 89. The light-receiving lens 89 and the optical sensor 24 are housed in a case 92 with keeping a predetermined position relationship between them. The case 92 is fixed near the upper end of a column support 94, implanted in and extending from the upper surface of a base 16, through a mounting member 93.

[0055] As the optical sensor 24, a photoelectric conversion device (light-receiving device) capable of accurately detecting a faint light, such as, for example, a

photomultiplier tube is used. The signal processing circuit 42 for output signals from the optical sensor 24 includes an amplifier, a sample holder, an A/D converter (typically having a resolution of 16 bits), etc. (see FIG. 8). In the embodiment, signal sensitivity (detection sensitivity) is set by setting an applied voltage between the negative and positive electrodes of the optical sensor 24. The details will be described later.

[0056] As described above, although the slit 22 is formed in the reflection film 83, the following describes the slit 22 as being formed in the slit plate 90 for convenience.

[0057] According to the aerial image measuring device 59 configured as mentioned above, upon measuring a projected image (aerial image) of the measurement mark formed on the reticle R through the projection optical system PL in a manner as described later, when the slit plate 90 constituting part of the aerial image measuring device 59 is illuminated with the illumination light IL that passed through the projection optical system PL, the illumination light IL that passed through the slit 22 on the slit plate 90 is guided to the outside of the wafer stage WST through the lens 84, the mirror 88, the lens 86, and the light-sending lens 87. Then, the optical path of the light guided to the outside of the wafer stage WST is bent by the mirror M upward in the vertical direction, and received by the optical sensor 24 through the light-receiving lens 89 so that photoelectrically converted signals (light intensity

signals) P corresponding to the amount of received light are output from the optical sensor 24 to the main controller 20 through the signal processing circuit 42.

[0058] In the embodiment, the projected image (aerial image) of the measurement mark is measured in a slit-scan manner. Upon this measurement, the light-sending lens 87 moves relative to the light-receiving lens 89 and the optical sensor 24. Therefore, in the aerial image measuring device 59, the sizes of each lens and the mirror M are so set that all the light from the light-sending lens 87 moving within a predetermined range will be incident on the light-receiving lens 89.

[0059] Thus, in the aerial image measuring device 59, the slit plate 90, the lenses 84, 86, the mirror 88, and the light-sending lens 87 constitute a light leading section for leading light through the slit 22 to the outside of the wafer stage WST. On the other hand, the light-receiving lens 89 and the optical sensor 24 constitute a light receiving section for receiving the light led to the outside of the wafer stage WST. In this case, the light leading section and the light receiving section are mechanically separate from each other. Then, only upon measurement of the aerial image, the light leading section and the light receiving section are optically connected through the mirror M.

[0060] In other words, in the aerial image measuring device 59, since the optical sensor 24 is provided in a

predetermined position outside of the wafer stage WST, the measurement accuracy or the like of the laser interferometer 31 is not adversely affected by heat from the optical sensor 24. Further, the inside and outside of the wafer stage WST are not connected through a light guide or the like, the driving accuracy of the wafer stage WST is also not adversely affected unlike in the case where the inside and outside of the wafer stage WST are connected through a light guide.

[0061] Of course, if the influence of heat can be avoided, the optical sensor 24 may be provided inside the wafer stage WST. The shape, size, etc. of the slit 22 on the slit plate 90 constituting part of the aerial image measuring device 59, the aerial image measuring method using the aerial image measuring device 59, and the optical characteristic measuring method will be described in detail later.

[0062] Returning to FIG. 1, an off-axis alignment system ALG as a mark detection system for detecting an alignment mark on the wafer W is provided on one side of the projection optical system PL. In the embodiment, an image processing type alignment sensor, which is so-called an FIA (Field Image Alignment) system, is used as the alignment system ALG. As shown in FIG. 2, this alignment system ALG includes an alignment light source 32, a half mirror 34, a first objective lens 36, a second objective lens 38, an image pickup device (CCD) 40, etc. Here, as the light

source 32, a halogen lamp or the like for irradiating broadband illumination light is used. As shown in FIG. 3, in this alignment system ALG, an alignment mark Mw on the wafer W is illuminated with illumination light from the light source 32 through the half mirror 34 and the first objective lens 36. On the other hand, the reflected light from the alignment mark portion is received on the image pickup device 40 through the first objective lens 36, the half mirror 34, and the second objective lens 38. Thus, a bright field image of the alignment mark Mw is formed on the light-receiving surface of the image pickup device. Then, photoelectrically converted signals corresponding to the bright field image, that is, light intensity signals corresponding to the reflected image of the alignment mark Mw are supplied from the image pickup device 40 to the main controller 20. Based on the light intensity signals, the main controller 20 calculates the position of the alignment mark Mw based on the detection center of the alignment microscope ALG. Further, based on the calculation result and position information of the wafer stage WST as the output of the wafer interferometer 31 at that time, the main controller 20 calculates the coordinate position of the alignment mark Mw in a stage coordinate system defined by the optical axis of the wafer interferometer 31.

[0063] Further, as shown in FIG. 1, the exposure apparatus 100 of the embodiment has a light source turned on and off under the control of the main controller 20, and an oblique

incidence type multipoint focal position detecting device (focus sensor) is provided. The oblique incidence type multipoint focal position detecting device consists of an irradiation system 60a irradiating an imaging light flux for forming a number of pinhole images or a slit image obliquely with respect to the optical axis AX toward the imaging surface of the projection optical system PL, and a light-receiving system 60b receiving the imaging light flux reflected by the surface of the wafer W. When the focus of the projection optical system PL changes, the main controller 20 controls the inclination of the reflected light flux from a plane-parallel plate, not shown, inside the light-receiving system 60b with respect to the optical axis to give an offset to the multipoint focal position detecting device (60a, 60b) according to the change in the focus of the projection optical system PL, thus performing calibration. The details of a multipoint focal position detecting device (focus sensor) having a structure similar to the focal position detection system (60a, 60b) of the embodiment are disclosed, for example, in Japanese Patent Laid-Open No. 06-283403.

[0064] Upon scanning exposure or the like to be described later, the main controller 20 controls not only the movement of the wafer stage WST in the Z-axis direction through the wafer stage driving system, not shown, but also inclination at two-dimensional points (that is, rotation in the  $\theta_x$  and  $\theta_y$  directions) based on an out-of-focus signal

(defocus signal), for example, an S-curve signal, from the light-receiving system 60b so that the defocus will be zero. In other words, the movement of the wafer stage WST is controlled using the multipoint focal position detecting device (60a, 60b) to perform auto-focusing and auto-leveling for the purpose of virtually aligning the imaging plane of the projection optical system PL with the surface of the wafer W within the illumination area (in the relation between the illumination area IAR and the imaging surface) of the illumination light IL.

[0065] Next, the operation of the exposure apparatus 100 according to the embodiment in the exposure process will be described in brief.

[0066] First, the reticle R is transported by a reticle transport system, not shown, and held under suction on the reticle stage RST at a loading position. Next, the main controller 20 controls the position of the wafer stage WST and the position of the reticle stage RST to measure a projected image (aerial image) of a reticle alignment mark, not shown, formed on the reticle R using the aerial image measuring device 59 in a manner as described later (see FIG. 2) so as to determine the projected position of the reticle pattern image. In other words, reticle alignment is carried out.

[0067] Next, the main controller 20 moves the wafer stage WST so that the aerial image measuring device 59 will come directly below the alignment system ALG, and under this

condition, the alignment system ALG detects the slit 22 on which the position of the aerial image measuring device 59 is based. The main controller 20 determines the relative position between the projected position of the pattern image of the reticle R and the alignment system ALG, that is, the baseline amount of the alignment system ALG, based on the detection signal from the alignment system ALG, the measured value from the wafer interferometer 31 at that time, and the projected position of the reticle pattern image previously determined.

[0068] Upon completion of the baseline measurement, the main controller 20 performs wafer alignment such as EGA (Enhanced Global Alignment) disclosed in detail, for example, in Japanese Patent Laid-Open No. 61-44429 to determine the positions of all shot areas on the wafer W. Note that, upon this wafer alignment, a wafer alignment mark New for a predetermined sample shot selected from the plural shot areas on the wafer W is measured using the alignment system ALG in the manner mentioned above (see FIG. 2).

[0069] Next, the main controller 20 monitors position information from the interferometers 31, 13 based on the position information on each shot area on the wafer W determined as mentioned above, and the baseline amount, while it locate the wafer stage WST at the scanning start position of a first shot area and the reticle stage RST at its scanning start position to perform scanning exposure in



the first shot area.

[0070] In other words, the main controller 20 starts relative scanning movement between the reticle stage RST and the wafer stage WST in a direction opposite to the Y-axis direction. Then, when both stages RST and WST reach a target scanning speed, respectively, illumination of the pattern area of the reticle R with exposure light EL is started, starting scanning exposure. Prior to the start of this scanning exposure, although the emission of the light source has already been started, since the main controller 20 controls the movement of each blade of the movable blind that forms part of the reticle blind in synchronization with the movement of the reticle stage RST, the irradiation of the exposure light EL to areas other than the pattern area on the reticle R is blocked in the same manner as in the conventional scanning stepper.

[0071] The main controller 20 controls the reticle stage RST and the wafer stage WST in synchronization with each other. Therefore, especially upon the above scanning exposure, a moving speed  $V_r$  of the reticle stage RST in the Y-axis direction and a moving speed  $V_w$  of the wafer stage WST in the X-axis direction are maintained in a speed ratio corresponding to the projection magnification of the projection optical system PL.

[0072] Then, different portions in the pattern area of the reticle R are sequentially illuminated with ultraviolet pulsed light to complete the illumination of the whole

pattern area, thus completing the scanning exposure to the first shot area on the wafer W. As a result, the circuit pattern of the reticle R is reduced and transferred to the first shot area through the projection optical system PL.

[0073] After the completion of the scanning exposure to the first shot area, a stepping operation is performed to move the wafer stage WST to the scanning start position of a second shot area. Then, scanning exposure to the second shot area is performed in the same manner as mentioned above. After that, third and further shot areas are scanning-exposed in the same manner.

[0074] Thus, the stepping operation between shots and the scanning exposure operation are repeated in a step-and-scan manner to transfer the pattern of the reticle R to all the shot areas on the wafer W.

[0075] During the scanning exposure, the above-mentioned auto-focusing and auto-leveling are performed using the focus sensor (60a, 60b) integrally mounted with the projection optical system PL.

[0076] In order to align a pattern of the reticle R accurately with patterns already formed in previous shot areas on the wafer W during the scanning exposure, it is important to accurately measure the optical characteristics or baseline amount of the projection optical system PL and to adjust the optical characteristics of the projection optical system PL to desired conditions.

[0077] In the embodiment, the aerial image measuring device

59 is used to measure the imaging characteristics. The following describes in details the aerial image measurement using this aerial image measuring device 59, the optical characteristics measurement of the projection optical system PL, etc.

[0078] FIG. 2 illustrates a state during using the aerial image measuring device 59 to measure an aerial image of a measurement mark formed on a reticle R. As the reticle R, a reticle designed specifically for measuring an aerial image, or a device reticle for manufacturing a kind of devices with a measurement mark formed on it is used. Instead of these reticles, a fixed mark plate (also called a reticle fiducial mark plate) made of the same glass material as the reticle may be provided on the reticle stage RST so that measurement mark formed on the mark plate will be used.

[0079] As shown in FIG. 2, it is assumed that a measurement mark PM consisting of a line-and-space mark is formed in a predetermined portion of the reticle R to have a periodicity in the Y-axis direction. It is also assumed that the slit 22 elongated in the X-axis direction and having a predetermined width 2D as shown in FIG. 4(A) is formed in the slit plate 90 of the aerial image measuring device 59. Here, the predetermined width 2D is set to about a half-pitch of a line-and-space pattern with 1:1 duty ratio corresponding to the resolution limit, for example,  $2D=0.2\ \mu\text{m}$ . The term "line and space" is abbreviated appropriately as "L/S" below.

[0080] In measuring an aerial image, the main controller 20 drives the movable reticle blind 12 through a blind driving device, not shown, to limit the illumination area of the reticle R with the illumination light IL to the area of the measurement mark PM alone (see FIG. 2). Under this condition, when the reticle R is illuminated with the illumination light IL, the light (illumination light IL) diffracted and scattered by the measurement mark PM as shown in FIG. 2 is refracted through the projection optical system PL to form an aerial image (projected image) PM' of the measurement mark PM on the image plane of the projection optical system PL. It is assumed that the wafer stage WST is placed in a position where the aerial image PM' will be formed on the +Y side (or -Y side) of the slit 22 on the slit plate 90 of the aerial image measuring device 59. FIG. 4(A) illustrates a plan view of the slit plate 90 of the aerial image measuring device 59 at that time.

[0081] Then, when the main controller 20 drives the wafer stage WST in the +Y direction indicated by arrow F in FIG. 4(A) through the wafer stage driving system, the slit 22 is scanned relative to the aerial image PM' along the Y-axis direction. During this scanning, the light (illumination light IL) passing through the slit 22 is received by the optical sensor 24 through the light leading section and the light-receiving lens 89 within the wafer stage WST, and the photoelectrically converted signals are supplied to the main controller 20 through the signal processing circuit 42.

The main controller 20 measures a light intensity distribution corresponding to the aerial image PM' based on the photoelectrically converted signals.

[0082] FIG. 4(B) illustrates an example of photoelectrically converted signals (light intensity signals) P obtained during the aerial image measurement.

[0083] In this case, the aerial image PM' is equalized under the influence of the width (2D) of the slit 22 in the scanning direction (Y-axis direction).

[0084] Therefore, if the slit is  $p(y)$ , the intensity distribution of the aerial image is  $i(y)$ , and the observed light intensity signal is  $m(y)$ , the relationship between the intensity distribution  $i(y)$  of the aerial image and the observed intensity signal  $m(y)$  can be represented by the following equation (1), where the intensity distribution  $i(y)$  and the intensity signal  $m(y)$  represent intensity per unit length:

[0085]

[Equation 1]

$$m(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(y-u) \cdot i(u) du \quad \dots(1)$$

[0086]

[Equation 2]

$$p(y) = \begin{cases} 1(|y| \leq D) \\ 0(|y| > D) \end{cases} \quad \dots(2)$$

[0087] In other words, the observed intensity signal  $m(y)$  is a convolution of the slit  $p(y)$  and the intensity distribution  $i(y)$  of the aerial image.

[0088] Therefore, it can be said that the smaller the slit width 2D, the more the measurement accuracy. In case of use of a PMT as the optical sensor 24 like in the embodiment, the light amount (light intensity) can be detected by slowing down the scanning speed to take time for measurement even if the slit width is very small. However, in practice, since the scanning speed upon aerial image measurement has a limitation from the aspect of throughput, if the slit width 2D is too small, the amount of light passing through the slit 22 becomes too low, making the measurement difficult.

[0089] The present inventors found from their simulations and experiments that the optimum value of the slit width 2D was about half of the resolution limit pitch (L/S pattern pitch with 1:1 duty ratio) of the exposure apparatus. Therefore, the slit width 2D is set to such a value in the embodiment.

[0090] The above-mentioned aerial image measuring device 59 and the aerial image measuring method using the same are used for the following purposes: a. Detection of Best Focus Position; b. Detection of Imaging Position of Pattern Image in XY Plane; c. Baseline Measurement of Alignment System ALG; etc.

[0091] Among them, c. Baseline Measurement in the exposure apparatus 100 of the embodiment has already been described. As for b. Detection of Imaging Position of Pattern Image in XY Plane, the measurement method does not need to change

between a repetitive pattern with a relatively narrow pitch and an isolated line or a repetitive pattern with a relatively wide pitch. Further, since this purpose has less connection with the present invention, the following describes about a. Detection of Best Focus Position.

[0092] This detection of the best focus position is used for the purpose of, for example, detecting the best focus position of the projection optical system PL or detecting the optimum imaging surface (image plane).

[0093] In the embodiment, the best focus position of the projection optical system PL is detected as an example as follows:

[0094] In detecting the best focus position, for example, a reticle R on which an L/S mark having a line width of 0.15  $\mu\text{m}$  on the wafer (0.75  $\mu\text{m}$  on the reticle) is formed as the measurement mark PM at a pitch of 1.5  $\mu\text{m}$  (1:9 duty ratio 1:9) is used.

[0095] First, the reticle R is loaded on the reticle stage RST by a reticle loader, not shown. Next, the main controller 20 moves the reticle stage RST to locate the measurement mark PM on the reticle R at a certain point (on the optical axis of the projection optical system PL in this example) so as to measure the best focus position within the field of view of the projection optical system PL.

[0096] Next, the main controller 20 controls driving of the movable reticle blind 12 to define the illumination area so

that only the measurement mark PM will be illuminated with the illumination light IL. Under this condition, the main controller 20 irradiates the illumination light IL to the reticle R to measure an aerial image of the measurement mark PM using the aerial image measuring device 59 in the same slit-scan manner as mentioned above while scanning the wafer stage WST in the Y-axis direction. During this detection, the main controller 20 repeats measurements plural times while changing the position of the slit plate 90 in the Z-axis direction (that is, the Z position of the wafer stage WST) at a pitch of, for example, 0.1  $\mu\text{m}$  in 15 steps, and stores a light intensity signal (photoelectrically converted signal) obtained at each time step in its internal memory. The range of steps is determined, for example, by setting a design best focus position almost at the center of the step range.

[0097] Here, in the above-mentioned aerial image measurements, when the slit plate 90 is scanned at a first Z position to capture a light intensity signal corresponding to the aerial image of the measurement mark PM, detection sensitivity is set (calibrated) in such a manner to make the most effective use of the dynamic range of the signal processing circuit 42 provided downstream of the optical sensor 24. This point will be described later.

[0098] In this case, for example, if the measurement mark is an L/S mark (L/S pattern) with 1:1 duty ratio, each of the light intensity signals is subjected to Fourier



transform, respectively, to determine contrast as a amplitude ratio between a first-order frequency component and a zero-order frequency component, respectively. Since this contrast varies sensitively depending on the focus position, it is convenient to decide on the best focus position from the intensity signal. However, in case of use of a measurement mark PM consisting of an L/S pattern (a quasi-isolated line) with 1:9 duty ratio, since the repetition pitch is large, degrading the accuracy of focus detection using the first-order frequency component. This is because the DOF of such a dull pattern is large. However, since the amplitude of higher-order frequency components are not sufficiently large, accuracy is also degraded even if focus detection is performed using only higher-order frequency components.

[0099] Therefore, in the embodiment, the main controller 20 calculates the best focus position by the following first and second methods based on a plurality of light intensity signals (photoelectrically converted signals) obtained in the repeated operations:

[0100] a. First Method. In the first method, an area corresponding to the light intensity signals corresponding to an aerial image of an isolated line (or one line in a quasi-isolated line pattern) is divided into a central area (first area) with a design line width having an imaging position (central position) at the center in the XY plane of a design pattern and both-side peripheral areas (second

area) to determine the best focus position using an area ratio between both areas as an evaluation amount. The detection principle of the first method will be described below based on FIGS. 5 and 6.

[0101] In FIG. 5(A), the intensity of slit transmitted light in the best focus condition obtained from a simulation using a measurement mark having the same size as the above-mentioned measurement mark PM and the slit width set as mentioned above is indicated by taking the Y position of the slit 22 (or the Y position of the wafer stage WST) on the abscissa. In FIG. 5(B), the intensity of slit transmitted light in a 1- $\mu$ m defocus condition is indicated by taking the Y position of the slit 22 (or the Y position of the wafer stage WST) on the abscissa.

[0102] In FIG. 5(A), if an area ratio between the surface area  $A=A_1$  of a design line width area having the imaging position (central position) at the center in a design XY plane of one line pattern of the measurement mark PM surrounded by light intensity signal  $P_1$  and the abscissa, and the surface area  $B=B_1 (=b_1+b_2)$  of the both-side areas is  $\alpha_1$ ,  $\alpha_1$  is represented by the following equation (3):

$$\alpha_1 = A_1 / B_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

[0103] On the other hand, in FIG. 5(B), if an area ratio between the surface area  $A=A_2$  of a design line width area having the imaging position (central position) at the center in a design XY plane of one line pattern of the measurement mark PM surrounded by light intensity signal  $P_2$

and the abscissa, and the surface area  $B=B_2$  ( $=b_3+b_4$ ) of the both-side areas is  $\alpha_2$ ,  $\alpha_2$  is represented by the following equation (4):

$$\alpha_2=A_2/B_2 \quad \text{.....(4)}$$

[0104] It is apparent from a comparison between FIG. 5(A) and FIG. 5(B) that  $\alpha_1>\alpha_2$ .

[0105] Therefore, if an area ratio  $\alpha$  represented by the following equation (5) is used as the evaluation amount, the best focus position can be detected accurately:

$$\text{Area Ratio } \alpha=A/B \quad \text{.....(5)}$$

[0106] Various methods of detecting the best focus position using the above-mentioned area ratio  $\alpha$  as the evaluation amount can be considered. As an example, as shown in FIG. 6, the area ratio  $\alpha$  calculated based on light intensity signals each obtained at each position (Z position) of the slit plate 90 in the optical axis direction is plotted in an orthogonal coordinate system in which the Z position is taken on the abscissa (see "x" marks in FIG. 6). These plotted points are joined by curve approximation (curve fitting). For example, about a fourth-order approximate curve is determined by a least-squares method. Then, the approximate curve is sliced at an appropriate threshold level (slice level) SL, and intersecting points J and K between the slice level SL and the approximate curve are determined. Then, an intersection point G between the approximate curve and a vertical axis (axis of the evaluation amount  $\alpha$ ) passing through a midpoint O between

these intersecting points J and K (a point at a distance of  $L/2$  from the points J and K, respectively) is considered as a peak point of the approximate curve to determine the coordinate value  $Z_0$  on the abscissa corresponding to the peak point G as the best focus position.

[0107] As discussed above, in measuring the best focus position, the Z position is changed typically at a pitch of about  $0.1 \mu\text{m}$  in about 15 steps to measure the aerial image in a slit-scan manner. In this case, it is important to determine the peak position from information obtained at as many measuring points (Z positions) as possible in order to ensure proper measurement repeatability. FIG. 6 illustrates an example in which the best focus position is determined from area ratios  $\alpha$  at 13 points.

[0108] b. Second Method. In the second method, an area corresponding to light intensity signals corresponding to an aerial image of an isolated line (or one line in a quasi-isolated line pattern) is divided by a predetermined threshold level into two parts to determine the best focus position using an area ratio between an upper area (first area) and a lower area (second area) of the threshold level as an evaluation amount. The detection principle of the second method will be described below based on FIGS. 7(A) and 7(B).

[0109] In FIGS. 7(A) and 7(B), the intensity of slit transmitted light obtained from the same simulations as those in FIGS. 5(A) and 5(B), respectively, is indicated by

taking the Y position of the slit 22 (or the Y position of the wafer stage WST) on the abscissa.

[0110] In FIG. 7(A), if an area ratio between the surface area  $C=C_1$  of the upper area and the surface area  $E=E_1$  of the lower area, into which the area surrounded by light intensity signal  $P_1$  and the abscissa is divided by a predetermined slice level (threshold level)  $SL'$ , is  $\gamma_1$ ,  $\gamma_1$  is represented by the following equation(6):

$$\gamma_1 = C_1/E_1 \quad \text{.....(6)}$$

[0111] Here, for example, light intensity at a peak point in the best focus condition is predetermined through experiments and the like to set the slice level  $SL'$  to about 50% of the peak value.

[0112] On the other hand, in FIG. 7(B), the surface area of the upper area of the predetermined slice level (threshold level)  $SL'$  by which the area surrounded by light intensity signal  $P_4$  and the abscissa is divided is  $C=0$ . If the area ratio between the area surface of the upper area and the area surface  $E=E_2$  of the lower area of the slice level (threshold level)  $SL'$  is  $\gamma_2$ ,  $\gamma_2$  is represented by the following equation (7):

$$\gamma_2 = 0/E_2 = 0 \quad \text{.....(7)}$$

In this case, it is apparent that  $\gamma_1 > \gamma_2$ .

[0113] Therefore, if an area ratio  $\gamma$  represented by the following equation (8) is used as the evaluation amount, the best focus position can be detected accurately:

$$\text{Area Ratio } \gamma = C/E \quad \text{.....(8)}$$

[0114] Also in this case, the method of determining the best focus position using the area ratio  $\gamma$  as the evaluation amount can be employed intact. To be more specific, the area ratio  $\gamma$  calculated based on light intensity signals each obtained at each position (Z position) of the slit plate 90 in the optical axis direction is plotted in the manner as described above in an orthogonal coordinate system in which the Z position is taken on the abscissa. Then, these plotted points are joined by curve approximation to determine a peak point of the approximate curve based on the above-mentioned slice midpoint method so as to determine a coordinate value on the abscissa corresponding to the peak point as the best focus position.

[0115] Further, the image plane shape of the projection optical system PL can be detected as follows:

[0116] First, the reticle R is loaded on the reticle stage RST by a reticle loader, not shown. Next, the main controller 20 moves the reticle stage RST to locate the measurement mark PM at a first detection point (on the optical axis of the projection optical system PL in this example) within the field of view of the projection optical system PL. Next, the main controller 20 controls driving of the movable reticle blind 12 to define the illumination area so that only the measurement mark PM will be illuminated with the illumination light IL. Under this condition, the main controller 20 irradiates the

illumination light IL to the reticle R to measure an aerial image of the measurement mark PM using the aerial image measuring device 59 in the same slit-scan manner as mentioned above and hence to detect a best focus position  $Z_1$  of the projection optical system PL, storing the result in its internal memory.

[0117] After the completion of detecting the best focus position at the first detection point within the field of view of the projection optical system PL, the main controller 20 moves the reticle stage RST to locate the measurement mark PM at a second detection point within the field of view of the projection optical system PL. Next, the main controller 20 controls driving of the movable reticle blind 12 to define the illumination area so that only the measurement mark PM will be illuminated with the illumination light IL. Under this condition, the main controller 20 irradiates the illumination light IL to the reticle R to measure an aerial image of the measurement mark PM in the same slit-scan manner as mentioned above and hence to detect a best focus position  $Z_2$  of the projection optical system PL, storing the result in its internal memory.

[0118] After that, the main controller 20 repeats measurements of aerial images of the measurement mark PM and detections of best focus positions while changing the detection points within the field of view of the projection optical system PL in the same manner as mentioned above.

[0119] Then, statistical processing is performed based on each of the best focus positions  $Z_1$ ,  $Z_2$ , .....,  $Z_n$  thus obtained to calculate the image plane shape of the projection optical system PL. In this processing, an image plane curvature may also be calculated in addition to the image plane shape. Note that although the reticle R is moved to measure the best focus positions at plural measuring points at which the measurement mark PM is arranged, respectively, a plurality of measurement marks PM may be formed on the reticle R so that the measurement marks PM will be sequentially illuminated with the illumination light IL through the movable reticle blind 12 to detect best focus positions at respective points.

[0120] The image plane of the projection optical system PL, that is, the best imaging surface, is a surface composed of a set of best focus points among an infinite number of points different in distance from the optical axis (that is, an infinite number of points different in image height). Therefore, the image plane shape can be determined easily and accurately by such a technique.

[0121] In case of use of a photomultiplier tube (PMT) as the optical sensor 24 like in the embodiment to measure the aerial image, it is preferable to set signal sensitivity (detection sensitivity) in such a manner to make effective use of the dynamic range of the optical sensor 24 and the signal processing circuit system including the signal processing circuit for the optical sensor even if an L/S



pattern, for example, with 1:1 duty ratio, is used as the measurement mark. Especially, in case of use of a quasi-isolated line pattern with 1:9 duty ratio as the measurement mark like in the embodiment, the amplitude of fundamental waves tend to be smaller than that of the L/S pattern with 1:1 duty ratio. In this case, since measurement accuracy is degraded, it is important to adjust the signal sensitivity.

[0122] The following describes about a signal sensitivity setting method (calibration method) for the signal processing system for processing signal light (slit transmitted light) in the exposure apparatus 100 of the embodiment.

[0123] In general, the sensitivity of the PMT is set depending on the applied voltage. In other words, if the number of stages of an electron multiplier section (dynode) is  $n$  and the applied voltage between the positive and negative electrodes is  $V$ , a current multiplication factor  $\mu$  is in approximate proportion to the applied voltage  $V$  raised to the  $n$ -th power. Then, the sensitivity of the PMT is set to such a positive sensitivity not to waste the dynamic range of the downstream signal processing circuit.

[0124] However, in the embodiment, since the aerial image is measured for the purpose of detecting the best focus position, the best focus position is unknown at the time of measurement. Therefore, some contrivance is necessary to set the sensitivity. In other words, although the peak

level of the intensity signal becomes the maximum in the best focus condition, the best focus position itself is unknown. In this case, if the applied voltage is set by counting the peak level higher, it will be difficult to make the most effective use of the resolution (normally 16 bits) of the A/D converter by making the most effective use of the dynamic range. On the other hand, if the applied voltage is set by counting the peak level lower, the resolution could exceed the dynamic range.

[0125] Therefore, in the exposure apparatus 100 of the embodiment, the main controller 20 sets the applied voltage V based on the light intensity signals (photoelectrically converted signals) obtained in defocus conditions (or in such conditions that the best focus position is unknown) so that the maximum peak value upon the best focus will fall substantially within the dynamic range of the signal processing circuit 42. The following specifically describes about this.

[0126] FIG. 8 illustrates a schematic block diagram showing the structure of a signal processing system 50 for processing signal light (slit transmitted light).

[0127] This signal processing system 50 includes the optical sensor (PMT)24 and the signal processing circuit 42 that includes an amplifier circuit 44 consisting of an operational amplifier, a sample holder 46, an A/D converter 48, etc. A high voltage from a high-voltage power source 52 is applied between the positive and negative electrodes of

the optical sensor 24. Then, the main controller 20 sets the applied voltage from the high-voltage power source 52 based on the output of the A/D converter 48 according to the following principle to set the signal sensitivity of the signal processing system 50.

[0128] FIGS. 9(A) to 9(C) schematically illustrate variations in intensity signal of the aerial image of a quasi-isolated line pattern according to the focus position. These figures illustrate examples in which the slit width (2D) is sufficiently small (almost infinitely small). FIG. 9(A) illustrates the best focus condition, and FIGS. 9(B) and 9(C) illustrate states in which the amount of defocus increases in this order. Since the total amount (cumulative luminous energy) of signal light (slit transmitted light) should be constant regardless of the amount of defocus, the surface area  $s$  of each peak and the total surface area  $S$  must be the same values in FIGS. 9(A) to 9(C), respectively,. Here, since the number of peaks is five, the cumulative luminous energy  $S=5 \times s$ . Further, since the signal capturing width is five pitches, if the pitch is  $p$ , the signal capturing width is  $5p$ . In FIGS. 9(A) to 9(C), the average value  $\text{ave}$  of signal intensity becomes a constant value ( $5s/5p=s/p$ ) in all cases (see FIG. 9(D)). Therefore, the applied voltage  $V$  is adjusted until the average value of signals obtained from unknown focus positions reaches a target value.

[0129] If a design line width is  $w$ , the following is

obtained from FIG. 9(A):

$$\text{PEAK} = s/w \quad \text{.....(9)}$$

On the other hand,

$$s = \text{ave} \times p \quad \text{.....(10)}$$

[0130] Therefore, the following equation is established:

$$\text{PEAK} = s/w = \text{ave} \times p/w \quad \text{.....(11)}$$

[0131] In other words, the peak value PEAK for the best focus in case of a quasi-isolated line pattern is converted from the target average value ave according to the above equation (11). Therefore, the applied voltage V is so decided that the peak value PEAK calculated by the above equation (11) will substantially fall within the dynamic range of the signal processing circuit 42. This makes it possible to set signal sensitivity in such a manner to make effective use of the dynamic range.

[0132] However, since the slit practically has a finite width, it is considered that the above-mentioned setting cannot be applied except in a special case (for example, a case where the width (0.2  $\mu\text{m}$ ) of the slit coincides with the line width). When the slit has a finite width, the signal becomes dull depending on the slit width. In this case, in order to make effective use of the dynamic range, it is necessary to match the peak value of the dull signal to the peak value before the signal becomes dull. Therefore, the following describes a method of matching the peak of a dull signal to a signal peak value when the slit width is sufficiently small.

[0133] First, as shown in FIG. 10(A), description is made about a case where the width MARK of an aerial image PM' of a target mark in the scanning direction is larger than the width 2D of the slit 22.

[0134] FIG. 10(B) illustrates intensity signals of the aerial image PM' when the slit width is sufficiently small (infinitely small). FIG. 10(C) illustrates the intensity signal of the aerial image PM' when the slit width 2D is finite. In these figures, if the peak value is represented as PEAK, approximation can be performed to obtain Surface Area SA=Surface Area SB. Therefore, the following equation (12) is established:

$$\text{PEAK}=\text{SA}/\text{MARK}=\text{SB}/\text{MARK} \quad \text{.....(12)}$$

[0135] From the above equation (12), a signal peak value when the width of the slit 22 is sufficiently small (when it is almost close to the best focus condition) can be calculated based on an integrated value of one peak of photoelectrically converted signals obtained by scanning the slit 22 having a finite width and the width (design value) of the aerial image PM' of the measurement mark in the scanning direction. This equation (12) is considered just to replace s and w in the equation (11) with SB and MARK, respectively, that is, both are considered practically equivalent. In other words, the integrated value (surface area value) of one peak of the photoelectrically converted signals is divided by the mark width, so that the peak value PEAK when the slit width is

sufficiently small can be calculated. Therefore, the applied voltage  $V$  is so decided that the peak value  $PEAK$  calculated by the above equation (12) will substantially fall within the dynamic range of the signal processing circuit 42. This makes it possible to set signal sensitivity in such a manner to make effective use of the dynamic range.

[0136] Next, as shown in FIG. 11(A), description is made about a case where the width of an aerial image  $PM'$  of a target mark in the scanning direction is smaller than the width  $2D$  of the slit 22.

[0137] FIG. 11(B) illustrates intensity signals of the aerial image  $PM'$  when the slit width is sufficiently small (infinitely small). FIG. 11(C) illustrates intensity signals of the aerial image  $PM'$  when the slit width  $2D$  is finite. In these figures, if the peak value is represented as  $PEAK$ , the following equation (13) is established:

$$PEAK = SC / MARK = SD / 2D \quad \dots (13)$$

[0138] From the above equation (13), a signal peak value when the width of the slit 22 is sufficiently small (when it is almost close to the best focus condition) can be calculated based on an integrated value of one peak of photoelectrically converted signals obtained by scanning the slit 22 having a finite width and the width  $2D$  of the slit. In other words, the integrated value (surface area value) of one peak of the photoelectrically converted signals is divided by the slit width  $2D$ , so that the peak

value PEAK when the slit width is sufficiently small can be calculated. Therefore, the applied voltage  $V$  is so decided that the peak value PEAK calculated by the equation (13) will substantially fall within the dynamic range of the signal processing circuit 42. This makes it possible to set signal sensitivity in such a manner to make effective use of the dynamic range.

[0139] It is apparent from the above relations that signal sensitivity can be set to make the most effective use of the dynamic range of the signal processing system 50 based on a value determined by dividing the integrated value of one peak of the photoelectrically converted signals, obtained by scanning the slit 22 having a finite width, by larger one of the line width of the aerial image  $PM'$  of the measurement mark (a design value calculated from the line width of the measurement mark times projection magnification) and the slit width  $2D$ .

[0140] The above-mentioned method of setting the signal sensitivity (detection sensitivity) can be applied not only to a case where the PMT is used as the optical sensor, but also any other case where the detection sensitivity of another photoelectric conversion device is set, such as, for example, to set the gain of an amplifier as an output amplification part of the photoelectric conversion device.

[0141] As apparent from the above description, in the embodiment, the main controller 20 serves as a measurement processing device, a signal sensitivity setting device, and

a calculation device, and the main controller 20 and the aerial image measuring device 59 constitute an optical characteristic measuring device.

[0142] As described above in detail, according to the exposure apparatus 100 of the embodiment, the illumination system 10 illuminates a measurement mark PM to form an aerial image PM' of the measurement mark PM on the image plane through the projection optical system PL. Under this condition, the main controller 20 uses the aerial image measuring device 59 to change the Z position of the slit plate 90 at a predetermined pitch so as to perform aerial image measurement on each Z position in a slit-scan manner. In other words, the main controller 20 scans the slit plate 90 in such a manner to scan the slit 22 relative to the aerial image PM' while it measures a light intensity distribution corresponding to the aerial image PM' based on the photoelectrically converted signals from the optical sensor 24. Then, the main controller 20 divides an area, surrounded by a waveform of photoelectrically converted signals obtained at respective Z positions of the slit plate 90 based on the above measurement and the scan axis of the slit plate 90, into a first area (A or C) indicating that the projection optical system PL is near the best focus position and a second area (B or E) indicating that it is far from the best focus position to calculate the best focus position using an area ratio ( $\alpha$  or  $\gamma$ ) between the first area and the second area as an evaluation amount.



[0143] Thus, the area surrounded by the waveform of the photoelectrically converted signals and the scan axis of the slit plate 90 (slit 22) is just divided by the above-mentioned criteria into two areas without Fourier transform or the like of the intensity signals (photoelectrically converted signals) of the aerial image. Then, according to the area ratio between the two areas, the best focus position of the projection optical system PL can be measured accurately regardless of the type of measurement mark even if not only an L/S mark having a relatively short pitch or interval but a measurement mark consisting of an isolated line or a quasi-isolated line is used.

[0144] Further, according to the signal sensitivity setting method for the signal processing system 50 performed in the exposure apparatus 100 of the embodiment, illumination light IL passes through a linear pattern (measurement mark) PM elongated on the substance surface of the projection optical system PL, for example, in the X-axis direction, and having a predetermined line width. The illumination light IL is irradiated onto the image plane through the projection optical system PL. Then, the slit 22 elongated on the image plane, for example, in the X-axis direction, and having a predetermined width is scanned with the illumination light IL, for example, along the Y-axis direction, and the illumination light IL that passed through the slit 22 is received by the optical sensor 24 to convert it to photoelectrically converted signals

corresponding to the intensity of received light. Then, based on an integrated value of the photoelectrically converted signals, the signal sensitivity of the signal processing system 50 is set in such a manner as mentioned above to make the most effective use of the dynamic range of the signal processing system 50. Thus, since the signal sensitivity is set in such a manner to make the most effective use of the dynamic range of the signal processing system, an intensity distribution of the illumination light IL, or in the embodiment, a light intensity distribution corresponding to the aerial image PM' of the measurement mark PM can be measured at a high resolution.

[0145] Further, according to the exposure apparatus 100 of the embodiment, since the aerial image measuring device 59 with the slit plate 90 integrally formed with the wafer stage WST is provided, the main controller 20 can use the aerial image measuring device 59 to accurately measure the best focus position of the projection optical system PL. Then, based on the measurement result of this best focus position, calibration information, for example, about the output of the multipoint focal position detecting device (60a, 60b) is set (that is, so-called focus calibration including the setting of focus offset is performed). This results in aligning the reticle R and the wafer W in a desired optical position relationship upon scanning exposure, and this can prevent poor exposure due to defocus and hence achieve precise exposure.

[0146] In each aforementioned embodiment, description has been made about a case where the present invention is applied to a step-and-scan type projection exposure apparatus. However, the present invention is not limited thereto, and can also be applied to a step-and-repeat type exposure apparatus, which transfers a mask pattern onto a substrate when both the mask and substrate are in a stationary state, and sequentially moves the mask in stepping operations.

[0147] In addition, in each aforementioned embodiment, description has been made about a case where the present invention is broadly applied to an exposure apparatus used in semiconductor manufacturing. However, the present invention is not limited thereto, and can be applied, for example, to an exposure apparatus for liquid crystal to transfer a liquid crystal display device pattern onto a square-shaped glass plate, or an exposure apparatus used in producing thin-film magnetic heads, image pickup devices, micromachines, DNA chips, reticles or masks, or the like.

[0148] In addition, in each aforementioned embodiment, description has been made about a case where KrF excimer laser light (248 nm), ArF excimer laser light (193 nm), or the like is used as the illumination light for exposure. However, the present invention is not limited thereto, and g-line (436 nm), i-line (365 nm), F2 laser light (157 nm), copper vapor laser, YAG harmonic laser, or the like can be used as the illumination light for exposure.

[0149] In addition, in each aforementioned embodiment, description has been made about a case where the projection optical system used is a reduction and refraction system. However, the present invention is not limited thereto, and the projection optical system may be of a full-scale (1:1) or enlargement type, and of a dioptric, catadioptric, or catoptric type.

[0150] The exposure apparatus 100 of the embodiment can be manufactured by incorporating the illumination optical system and the projection optical system PL, both composed of a plurality of lenses, into the main body of the exposure apparatus and performing optical adjustments while mounting the reticle stage RST and the wafer stage WST, made up of many mechanical components, in the main body of the exposure apparatus with wiring and piping thereto, and further performing overall adjustments (electrical adjustment, operation confirmation, etc.). Note that it is preferable to manufacture the exposure apparatus in a clean room where the temperature, cleanliness, and the like are controlled.

[0151] «Device Manufacturing Method» Next, description will be made of an embodiment of a device manufacturing method using the aforementioned exposure apparatus 100 in a lithographic process.

[0152] FIG. 12 is a flowchart illustrating an example of manufacturing devices (semiconductor chips such as ICs or LSIs, liquid crystal panels, CCDs, thin-film magnetic heads,

micromachines, etc.). As shown in FIG. 12, first in step 201 (designing step), the function and performance of the devices are designed (for example, circuit designing of a semiconductor device) and a pattern for implementing the function is designed. Then, in step 202 (mask making step), a mask on which the designed circuit pattern is formed is made. On the other hand, in step 203 (wafer manufacturing step), a wafer is manufactured from materials such as silicon.

[0153] Next, in step 204 (wafer processing step), an actual circuit or the like is formed on the wafer by lithography using the mask and the wafer prepared in steps 201 to 203 in a manner to be described later. Next, in step 205 (device assembling step), a device is assembled using the wafer processed in step 204. Step 205 includes dicing, bonding, packaging (chip sealing), etc. as required.

[0154] Finally, in step 206 (inspection step), operation checks, durability checks, and so on are done for the semiconductor devices manufactured in step 205. Thus, the semiconductor devices are completed via these processes, and they are shipped.

[0155] FIG. 13 illustrates a detailed flow of step 204 in manufacturing semiconductor devices. In FIG. 13, the surface of the wafer is oxidized in step 211 (oxidation step). In step 212 (CVD step), an isolating film is formed on the surface of the wafer. In step 213 (electrode formation step), electrodes are formed on the wafer by

vapor deposition. In step 214 (ion implantation step), ions are implanted into the wafer. Steps 211 to 214 described above constitute a pre-process for respective steps in the wafer process, and are selectively performed in accordance with processing required in each step.

[0156] After completion of the above pre-process for respective steps in the wafer process, a post-process is performed as follows: In this post-process, first in step 215 (resist formation step), a photosensitive material is applied to the wafer. Then, in step 216 (exposure step), the circuit pattern on the mask is transferred onto the wafer using the above-mentioned lithography system (exposure apparatus) and the exposure method. Next, in step 218 (etching step), exposed material portions other than those on which the resist remains are removed by etching. Then, in step 219 (resist stripping step), the resist material unnecessary after the etching process is removed.

[0157] By repeating the pre-process and the post-process, circuit patterns are formed one upon another on the wafer in a superimposed manner.

[0158] When the device manufacturing method described so far in the embodiment is used, the exposure apparatus of the aforementioned embodiment is used in the exposure process (step 216), so that poor exposure due to defocus can be prevented, and hence the reticle pattern can be transferred onto the wafer accurately. This can improve the productivity (including yield) of highly integrated

semiconductor devices.

[0159]

[Effects of the Invention] As described above, according to the optical characteristic measuring method of the present invention and the optical characteristic measuring device of the present invention, the best focus position of the projection optical system can be measured accurately regardless of the type of measurement mark.

[0160] Further, according to the signal sensitivity setting method of the present invention, a light intensity distribution can be measured accurately by making the most effective use of the resolution of the signal processing system.

[0161] Furthermore, according to the exposure apparatus of the present invention, poor exposure due to defocus can be prevented to achieve precise exposure.

[0162] Furthermore, according to the device manufacturing method of the present invention, device productivity can be improved.

[Brief Description of the Drawings]

[FIG. 1] It is a view schematically illustrating the structure of an exposure apparatus according to one preferred embodiment of the present invention.

[FIG. 2] It is a view illustrating the internal structure of an aerial image measuring device and an alignment microscope in FIG. 1.

[FIG. 3] It is a view illustrating a state when an

alignment mark on a wafer is being detected under the alignment microscope.

[FIG. 4] FIG. 4(A) is a plan view illustrating the aerial image measuring device when an aerial image  $PM'$  is formed on a slit plate during aerial image measurement, and FIG. 4(B) is a graph illustrating an example of photoelectrically converted signal (light intensity signal)  $P$  obtained during the aerial image measurement.

[FIG. 5] It contains graphs for explaining a first method of detecting the best focus position, in which FIG. 5(A) illustrates the intensity of slit transmitted light in the best focus condition obtained from a simulation by taking the  $Y$  position of a slit on the abscissa, and FIG. 5(B) illustrates the intensity of slit transmitted light in a  $1\text{-}\mu\text{m}$  defocus condition by taking the  $Y$  position of the slit on the abscissa.

[FIG. 6] It is a graph for explaining a method of determining the best focus position using an area ratio as an evaluation amount.

[FIG. 7] It contains graphs for explaining a second method of detecting the best focus position, in which FIG. 7(A) illustrates the intensity of slit transmitted light in the best focus condition obtained from a simulation by taking the  $Y$  position of a slit on the abscissa, and FIG. 7(B) illustrates the intensity of slit transmitted light in a  $1\text{-}\mu\text{m}$  defocus condition by taking the  $Y$  position of the slit on the abscissa.



[FIG. 8] It is a block diagram schematically illustrating a signal processing system for processing signal light (slit transmitted light).

[FIG. 9] FIGS. 9(A) to 9(D) are views for explaining a method of setting signal sensitivity when a slit width (2D) is sufficiently small (almost infinitely small).

[FIG. 10] FIGS. 10(A) to 10(C) are views for explaining the method of setting signal sensitivity when the slit width (2D) is finite and the width of the aerial image of a mark is larger than the slit width.

[FIG. 11] FIGS. 11(A) to 11(C) are views for explaining the method of setting signal sensitivity when the slit width (2D) is finite and the width of the aerial image of the mark is narrower than the slit width.

[FIG. 12] It is flowchart for explaining a device manufacturing method according to the present invention.

[FIG. 13] It is a flowchart illustrating the details of step 204 in FIG. 12.

[Description of Reference Numerals and Symbols]

10 ... Illumination System (Illumination Device), 20 ... Main Controller (Part of Measurement Processing Device, Calculation Device, Signal Sensitivity Setting Device, Optical Characteristic Measuring Device), 22 ... Slit (Measurement Pattern), 24 ... Optical Sensor (Photoelectric Conversion Device), 42 ... Signal Processing Circuit, 50 ... Signal Processing System, 59 ... Aerial Image Measuring Device (Part of Optical Characteristic Measuring Device),

90 ...Slit Plate (Pattern Forming Member), 100 ... Exposure  
Apparatus, PL ... Projection Optical System, IL ...  
Illumination Light, PM ... Measurement Mark, PM' ... Aerial  
Image, W ... Wafer (Substrate), R ... Reticle (Mask), WST ...  
Wafer Stage (Substrate Stage).

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-203763

(P2002-203763A)

(43) 公開日 平成14年7月19日 (2002.7.19)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テーマコード\* (参考)

H 0 1 L 21/027

G 0 3 F 7/22

H 5 F 0 4 6

G 0 3 F 7/22

H 0 1 L 21/30

5 1 6 A

5 2 6 B

審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2000-398902 (P2000-398902)

(22) 出願日 平成12年12月27日 (2000.12.27)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 萩原 恒幸

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 東畑 俊一

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74) 代理人 100102901

弁理士 立石 篤司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学特性計測方法及び装置、信号感度設定方法、露光装置、並びにデバイス製造方法

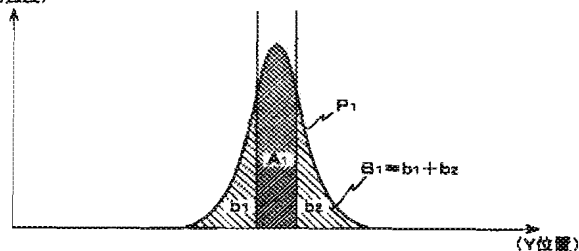
(57) 【要約】

【課題】 計測マークの種類によらず、投影光学系のベストフォーカス位置を高精度に計測する。

【解決手段】 照明光によって所定の計測マークを照明し、該計測マークの空間像を投影光学系を介して像面上に形成し、該空間像に対して計測用パターンを相対的に走査するとともに、計測用パターンを介した照明光の強度に応じた光電変換信号を計測用パターンの光軸方向の複数の位置毎に得る。そして、計測用パターンの光軸方向の位置毎に得られた光電変換信号、例えば信号  $P_1$ 、 $P_2$  の波形と計測用パターンの走査軸とが囲む領域を、投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第1の領域A (面積A) と、ベストフォーカス位置に遠いことを示す第2の領域B (面積B) とに分け、第1の領域と第2の領域との面積比  $A/B$  を評価値としてベストフォーカス位置を検出する。

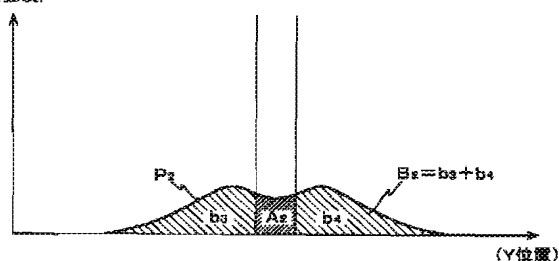
(A)

(光強度)



(B)

(光強度)



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 投影光学系の光学特性を計測する光学特性計測方法であって、

照明光によって所定の計測マークを照明し、該計測マークの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の像面側に配置された計測用パターンを前記空間像に対して相対的に走査するとともに、前記計測用パターンを介した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を前記計測用パターンの前記光軸方向の複数の位置毎に得る工程と；前記計測用パターンの光軸方向の位置毎に得られた前記光電変換信号の波形と前記計測用パターンの前記走査軸とが囲む領域を、前記投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第 1 の領域と、前記ベストフォーカス位置に遠いことを示す第 2 の領域とに分け、前記第 1 の領域と前記第 2 の領域との面積比を評価量として前記ベストフォーカス位置を検出する工程と；を含む光学特性計測方法。

【請求項 2】 前記光電変換信号は前記計測用パターンの各位置に対応する空間像の強度を表す像強度信号であり、前記第 1 の領域は、前記像強度信号に対応する領域を前記位置方向に沿って分割した際の設計上のベストフォーカス位置を含む所定幅の領域であり、前記第 2 の領域は、前記分割された残りの領域であることを特徴とする請求項 1 に記載の光学特性計測方法。

【請求項 3】 前記光電変換信号は前記計測用パターンの各位置に対応する空間像の強度を表す像強度信号であり、前記第 1 の領域は、前記像強度信号に対応する領域を所定の像強度の閾値を境に強度方向に沿って分割した最大像強度に近い側の領域であり、前記第 2 の領域は、前記分割された残りの領域であることを特徴とする請求項 1 に記載の光学特性計測方法。

【請求項 4】 前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むことを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれか一項に記載の光学特性計測方法。

【請求項 5】 前記計測マークは、前記走査方向に直交する方向に伸びる少なくとも 1 本のラインパターンから成る孤立線状のパターンであることを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載の光学特性計測方法。

【請求項 6】 前記計測用パターンは、前記光軸に垂直な 2 次元平面内で前記走査方向に直交する方向に伸びる所定幅のスリット状の開口パターンであることを特徴とする請求項 1 ～ 5 のいずれか一項に記載の光学特性計測方法。

【請求項 7】 前記光電変換信号の取得に際して、受光した信号光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と該光電変換素子から前記光電変換信号が入力

される処理回路とを含む信号処理系を用いるとともに、前記光電変換信号の 1 山分の積分値を、前記計測マークの線幅と前記計測用パターンの幅のうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて、前記信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように前記信号処理系の信号感度を設定していることを特徴とする請求項 1 ～ 6 のいずれか一項に記載の光学特性計測方法。

【請求項 8】 受光した信号光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と、該光電変換素子からの前記光電変換信号が入力される信号処理回路とを含む信号処理系の信号感度を設定する信号感度設定方法であって、

第 1 面上で第 1 方向に伸びる所定線幅の線状パターンを介して照明光を第 2 面上に照射する工程と；前記第 2 面上で、前記第 1 方向に伸びる所定幅の計測用パターンを、前記第 1 方向に直交する第 2 方向に沿って前記照明光に対して走査するとともに、前記計測用パターンを介した前記照明光を前記光電変換素子で受光し該受光した光の強度に応じた光電変換信号に変換する工程と；前記光電変換信号の積分値に基づいて、前記信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように前記信号処理系の信号感度を設定する工程と；を含む信号感度設定方法。

【請求項 9】 前記設定する工程では、前記光電変換信号波形の 1 山分の積分値を、前記線状パターンの線幅と前記計測用パターンの幅のうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて前記信号感度を設定することを特徴とする請求項 8 に記載の信号感度設定方法。

【請求項 10】 前記光電変換素子は、光電子増倍管であり、前記光電子増倍管に印加する印加電圧の設定により、前記信号感度の設定を行うことを特徴とする請求項 8 又は 9 に記載の信号感度設定方法。

【請求項 11】 投影光学系の光学特性を計測する光学特性計測装置であって、

所定の計測マークの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記計測マークを照明する照明装置と；前記投影光学系の像面側に配置され、計測用パターンが形成されたパターン形成部材と；前記計測用パターンを介した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と；前記照明装置により前記計測マークが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記空間像に対して前記計測用パターンが相対的に走査されるよう前記パターン形成部材を走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を前記パターン形成部材の前記光軸方向の複数の位置毎に計測する計測処理装置と；前記計測処理装置の計測結果として前記パターン形成部材の光軸方向の位置毎に得られた前記光電変換信号の波形と前記パターン形成部材の走査軸とで囲ま

10

20

30

40

50

れる領域を、前記投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第1の領域と、前記ベストフォーカス位置に遠いことを示す第2の領域とに分け、前記第1の領域と前記第2の領域との面積比を評価量として前記ベストフォーカス位置を算出する算出装置と；を備える光学特性計測装置。

【請求項12】 前記計測マークは、前記走査方向に直交する方向に伸びる少なくとも1本のラインパターンから成る孤立線状のパターンであることを特徴とする請求項11に記載の光学特性計測装置。

【請求項13】 前記計測用パターンは、前記光軸に垂直な2次元平面内で前記走査方向に直交する方向に伸びる所定幅のスリット状の開口パターンであることを特徴とする請求項11又は12に記載の光学特性計測装置。

【請求項14】 前記光電変換素子とともに所定のダイナミックレンジを有する信号処理系を構成する前記光電変換信号が入力される信号処理回路を更に備え、前記計測処理装置は、前記信号処理系の信号感度を設定する信号感度設定装置を含み、該信号感度設定装置は、光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する際に、前記光電変換信号の積分値に基づいて、前記信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように前記信号処理系の信号感度を設定することを特徴とする請求項11～13のいずれか一項に記載の光学特性計測装置。

【請求項15】 前記信号感度設定装置は、前記光電変換信号の1山分の積分値を前記計測マークの線幅と前記計測用パターンの幅のうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて前記信号感度を設定することを特徴とする請求項14に記載の光学特性計測装置。

【請求項16】 前記光電変換素子は、光電子増倍管であり、前記信号感度設定装置は、前記光電子増倍管に印加する印加電圧の設定により、前記信号感度の設定を行うことを特徴とする請求項14又は15に記載の光学特性計測装置。

【請求項17】 マスクに形成された回路パターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、前記基板を保持して移動する基板ステージと；前記パターン形成部材が前記基板ステージに一体的に設けられた請求項11～16のいずれか一項に記載の光学特性計測装置と；を備える露光装置。

【請求項18】 リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記リソグラフィ工程で、請求項17に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光学特性計測方法

及び装置、信号感度設定方法、露光装置、並びにデバイス製造方法に係り、更に詳しくは、像面に所定パターンの空間像を形成する投影光学系の光学特性計測方法及び該光学特性計測方法を実行するための光学特性計測装置、前記光学特性計測方法で空間像の計測に用いられる信号処理系の信号感度設定方法、前記光学特性計測装置を備える露光装置、並びに該露光装置を用いるデバイス製造方法に関する。

【0002】

10 【従来の技術】 従来より、半導体素子又は液晶表示素子等をフォトリソグラフィ工程で製造する際に、フォトリソマスク又はレチクル（以下、「レチクル」と総称する）のパターンを、投影光学系を介して表面にフォトリソ等の感光剤が塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に転写する投影露光装置、例えばステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置（いわゆるステッパ）や、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置（いわゆるスキャニング・ステッパ）等が用いられている。

20 【0003】 ところで、半導体素子等を製造する場合には、異なる回路パターンを基板上に幾層にも積み重ねて形成する必要があるため、回路パターンが描画されたレチクルと、基板上の各ショット領域に既に形成されたパターンとを正確に重ね合わせることが重要である。かかる重ね合わせを精度良く行うためには、投影光学系の光学特性（結像特性を含む）が所望の状態に調整されることが必要不可欠である。

30 【0004】 この投影光学系の光学特性の調整の前提として、光学特性を正確に計測する必要がある。この光学特性の計測方法の一つとして、実際に露光を行うことなく、計測マークが形成された計測用マスクを照明光により照明し投影光学系によって形成された計測マークの空間像（投影像）に対して矩形状又はスリット状の開口パターンを走査して、その開口パターンを透過した光を光電変換して空間像を計測し、この計測結果に基づいて光学特性を算出する方法（以下、「空間像計測法」と呼ぶ）も行われている。

40 【0005】 空間像計測法では、投影光学系のディストーション（倍率を含む）、コマ収差等の横の収差は勿論、ベストフォーカス位置、像面湾曲、球面収差等の縦の収差も計測することが可能である。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】 従来の空間像計測方法では、投影光学系のベストフォーカス位置の計測に際し、空間像に対応する光強度信号をフーリエ変換し、例えばその1次周波数成分の振幅と0次周波数成分の振幅との比であるコントラストなどの基本波成分の振幅に基づく評価量を用いていた。このため、ベストフォーカス位置計測用のマークとしては、基本波成分の検出に好適な比較的ピッチの狭いくり返しマーク、例えばライン部

の幅とスペース部の幅の比であるデューティ比が 1 : 1 のラインアンドスペースマークなどが用いられていた。かかるラインアンドスペースマークを用いたベストフォーカス位置の計測は、DRAM等のメモリを製造する場合には好適に使用することができる。

【0007】しかしながら、半導体露光装置はメモリの他、CPU、システムLSI等の製造に際しても用いられており、例えばCPUメーカーからは、孤立線や比較的回り返しピッチの広いくり返しマークに照準を合わせて投影光学系のベストフォーカス位置の計測が可能な新技術の出現が期待されている。

【0008】これは、投影光学系のベストフォーカス位置は、計測マークとして、比較的ピッチの狭いくり返しマークを用いた場合と、孤立線や比較的回り返しピッチの広いくり返しマーク（擬似孤立線）を用いた場合とでは、ベストフォーカス位置が異なるが、前述した基本波成分の振幅に基づく評価量を用いる手法では後者の場合に計測が困難となるためである。

【0009】本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、計測マークの種類によらず、投影光学系のベストフォーカス位置を高精度に計測することができる光学特性計測方法及び装置を提供することにある。

【0010】また、本発明の第2の目的は、信号処理系の分解能を最大限有効に利用して精度良く光強度分布を計測することを可能にする信号感度設定方法を提供することにある。

【0011】本発明の第3の目的は、デフォーカスに起因する露光不良の発生を抑制して高精度な露光を実現する露光装置を提供することにある。

【0012】本発明の第4の目的は、デバイスの生産性を向上させることができるデバイス製造方法を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の光学特性計測方法は、投影光学系（PL）の光学特性を計測する光学特性計測方法であって、照明光（IL）によって所定の計測マーク（PM）を照明し、該計測マークの空間像（PM'）を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の像面側に配置された計測用パターン（22）を前記空間像に対して相対的に走査するとともに、前記計測用パターンを介した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を前記計測用パターンの前記光軸方向の複数の位置毎に得る工程と；前記計測用パターンの光軸方向の位置毎に得られた前記光電変換信号の波形と前記計測用パターンの前記走査軸とが囲む領域を、前記投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第1の領域と、前記ベストフォーカス位置に遠いことを示す第2の領域とに分け、前記第1の領域と前記第2の領域との面積比を評価量として前記ベストフォー

カス位置を検出する工程と；を含む光学特性計測方法である。

【0014】これによれば、照明光によって所定の計測マークを照明し、該計測マークの空間像を投影光学系を介して像面上に形成し、該空間像に対して計測用パターンを相対的に走査するとともに、計測用パターンを介した照明光の強度に応じた光電変換信号を計測用パターンの光軸方向の複数の位置毎に得る。そして、計測用パターンの光軸方向の位置毎に得られた光電変換信号の波形と計測用パターンの走査軸とが囲む領域を、投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第1の領域と、ベストフォーカス位置に遠いことを示す第2の領域とに分け、第1の領域と第2の領域との面積比を評価量としてベストフォーカス位置を検出する。このため、空間像の強度信号（光電変換信号）をフーリエ変換等を行うことなく、得られた各光電変換信号の波形と計測用パターンの走査軸とが囲む領域を所定の基準で2つに分けるだけで、それら2つの領域の面積比により、計測マークの種類によらず、投影光学系のベストフォーカス位置を高精度に計測することが可能となる。

【0015】この場合において、第1の領域、第2の領域の設定方法は種々考えられる。例えば、請求項2に記載の光学特性計測方法の如く、前記光電変換信号は前記計測用パターンの各位置に対応する空間像の強度を表す像強度信号である場合に、前記第1の領域は、前記像強度信号に対応する領域を前記位置方向に沿って分割した際の設計上のベストフォーカス位置を含む所定幅の領域であり、前記第2の領域は、前記分割された残りの領域であることとすることができる。あるいは、請求項3に記載の光学特性計測方法の如く、前記光電変換信号は前記計測用パターンの各位置に対応する空間像の強度を表す像強度信号である場合に、前記第1の領域は、前記像強度信号に対応する領域を所定の像強度の閾値を境に強度方向に沿って分割した最大像強度に近い側の領域であり、前記第2の領域は、前記分割された残りの領域であることとすることができる。

【0016】上記1～3に記載の各光学特性計測方法において、請求項4に記載の光学特性計測方法の如く、前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むこととすることができる。

【0017】上記請求項1～4に記載の各光学特性計測方法において、前記計測マークは、繰り返し周期の短いラインアンドスペースマーク等であることとすることも勿論できるが、請求項5に記載の光学特性計測方法の如く、前記計測マークは、前記走査方向に直交する方向に伸びる少なくとも1本のラインパターンから成る孤立線状のパターンであることとすることもできる。ここで、「孤立線状のパターン」とは、孤立ラインパターンの

他、ライン部の幅とスペース部の幅との比であるデューティ比が 1 : (9 以上) となるラインアンドスペースマークであるいわゆる擬似孤立線パターンなども含む。本明細書では、他の部分においてもこのような意味で「孤立線状のパターン」なる用語を用いている。

【0018】上記請求項 1 ～ 5 に記載の各光学特性計測方法において、計測用パターンは矩形の開口パターンなどとすることもできるが、例えば請求項 6 に記載の光学特性計測方法の如く、前記計測用パターンは、前記光軸に垂直な 2 次元平面内で前記走査方向に直交する方向に伸びる所定幅のスリット状の開口パターンであることができる。

【0019】上記請求項 1 ～ 6 に記載の各光学特性計測方法において、請求項 7 に記載の光学特性計測方法の如く、前記光電変換信号の取得に際して、受光した信号光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と該光電変換素子から前記光電変換信号が入力される処理回路とを含む信号処理系を用いるとともに、前記光電変換信号の 1 山分の積分値を、前記計測マークの線幅と前記計測用パターンの幅のうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて、前記信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように前記信号処理系の信号感度を設定していることができる。

【0020】請求項 8 に記載の信号感度設定方法は、受光した信号光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子 (24) と、該光電変換素子からの前記光電変換信号が入力される信号処理回路 (42) とを含む信号処理系 (50) の信号感度を設定する信号感度設定方法であって、第 1 面上で第 1 方向に伸びる所定線幅の線状パターンを介して照明光を第 2 面上に照射する工程と；前記第 2 面上で、前記第 1 方向に伸びる所定幅の計測用パターンを、前記第 1 方向に直交する第 2 方向に沿って前記照明光に対して走査するとともに、前記計測用パターンを介した前記照明光を前記光電変換素子で受光し該受光した光の強度に応じた光電変換信号に変換する工程と；前記光電変換信号の積分値に基づいて、前記信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように前記信号処理系の信号感度を設定する工程と；を含む信号感度設定方法である。

【0021】これによれば、第 1 面上で第 1 方向に伸びる所定線幅の線状パターンを介して照明光を第 2 面上に照射し、第 2 面上で第 1 方向に伸びる所定幅の計測用パターンを、第 1 方向に直交する第 2 方向に沿って照明光に対して走査するとともに、前記計測用パターンを介した前記照明光を前記光電変換素子で受光し該受光した光の強度に応じた光電変換信号に変換する。そして、光電変換信号の積分値に基づいて、信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように信号処理系の信号感度を設定する。このように、信号処理系のダイナミックレンジが最大限有効に活用できるように信号感度

が設定される結果、高い分解能での照明光の強度分布の計測が可能となる。ここで、線状パターンから射出された照明光を第 2 面上に投射する投影光学系を備える場合には、計測用パターンを第 2 方向に沿って照明光に対して走査することにより、光電変換素子により線状パターンの空間像の強度に応じた光電変換信号が出力されるので、空間像を高い分解能で精度良く計測することが可能になる。

【0022】この場合において、請求項 9 に記載の信号感度設定方法の如く、前記設定する工程では、前記光電変換信号波形の 1 山分の積分値を、前記線状パターンの線幅と前記計測用パターンの幅のうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて前記信号感度を設定することができる。ここで、光電変換信号波形の 1 山分は、例えば 1 本の線状パターンから得られる信号に対応する。

【0023】上記請求項 8 及び 9 に記載の各信号感度設定方法において、請求項 10 に記載の信号感度設定方法の如く、前記光電変換素子は、光電子増倍管であり、前記光電子増倍管に印加する印加電圧の設定により、前記信号感度の設定を行うことができる。

【0024】請求項 11 に記載の光学特性計測装置は、投影光学系 (PL) の光学特性を計測する光学特性計測装置であって、所定の計測マーク (PM) の空間像 (PM') を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記計測マークを照明する照明装置 (10) と；前記投影光学系の像面側に配置され、計測用パターン (22) が形成されたパターン形成部材 (90) と；前記計測用パターンを介した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子 (24) と；前記照明装置により前記計測マークが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記空間像に対して前記計測用パターンが相対的に走査されるよう前記パターン形成部材を走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を前記パターン形成部材の前記光軸方向の複数の位置毎に計測する計測処理装置 (20) と；前記計測処理装置の計測結果として前記パターン形成部材の光軸方向の位置毎に得られた前記光電変換信号の波形と前記パターン形成部材の走査軸とで囲まれる領域を、前記投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第 1 の領域と、前記ベストフォーカス位置に遠いことを示す第 2 の領域とに分け、前記第 1 の領域と前記第 2 の領域との面積比を評価量として前記ベストフォーカス位置を算出する算出装置 (20) と；を備える光学特性計測装置である。

【0025】これによれば、照明装置により計測マークが照明され、投影光学系を介してその像面上に計測マークの空間像が形成される。この状態で、計測処理装置は、前記空間像に対して計測用パターンが相対的に走査

されるようパターン形成部材を走査するとともに、光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布をパターン形成部材の光軸方向の複数の位置毎に計測する。そして、算出装置では、計測処理装置の計測結果としてパターン形成部材の光軸方向の位置毎に得られた前記光電変換信号の波形とパターン形成部材の走査軸とで囲まれる領域を、投影光学系のベストフォーカス位置に近いことを示す第1の領域と、前記ベストフォーカス位置に遠いことを示す第2の領域とに分け、第1の領域と第2の領域との面積比を評価量としてベストフォーカス位置を算出する。このため、空間像の強度信号（光電変換信号）をフーリエ変換等を行うことなく、得られた各光電変換信号の波形とパターン形成部材（計測用パターン）の走査軸とが囲む領域を所定の基準で2つに分けるだけで、それら2つの領域の面積比により、計測マークの種類によらず、投影光学系のベストフォーカス位置を高精度に計測することが可能となる。

【0026】この場合において、請求項12に記載の光学特性計測装置の如く、前記計測マークは、前記走査方向に直交する方向に伸びる少なくとも1本のラインパターンから成る孤立線状のパターンであることとすることができる。

【0027】請求項11及び12に記載の各光学特性計測装置において、請求項13に記載の光学特性計測装置の如く、前記計測用パターンは、前記光軸に垂直な2次元平面内で前記走査方向に直交する方向に伸びる所定幅のスリット状の開口パターンであることとすることができる。

【0028】上記請求項11～13に記載の各光学特性計測装置において、請求項14に記載の光学特性計測装置の如く、前記光電変換素子とともに所定のダイナミックレンジを有する信号処理系（50）を構成する前記光電変換信号が入力される信号処理回路（42）を更に備え、前記計測処理装置は、前記信号処理系の信号感度を設定する信号感度設定装置（20）を含み、該信号感度設定装置は、光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する際に、前記光電変換信号の積分値に基づいて、前記信号処理系のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように前記信号処理系の信号感度を設定することとすることができる。

【0029】この場合において、請求項15に記載の光学特性計測装置の如く、前記信号感度設定装置は、前記光電変換信号の1山分の積分値を前記計測マークの線幅と前記計測用パターンの幅のうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて前記信号感度を設定することとすることができる。

【0030】上記請求項14及び15に記載の光学特性計測装置において、請求項16に記載の発明の如く、前記光電変換素子は、光電子増倍管である場合、前記信号感度設定装置は、前記光電子増倍管に印加する印加電圧

の設定により、前記信号感度の設定を行うこととすることができる。

【0031】請求項17に記載の露光装置は、マスク（R）に形成された回路パターンを投影光学系（PL）を介して基板（W）に転写する露光装置であって、前記基板を保持して移動する基板ステージ（WST）と；前記パターン形成部材（90）が前記基板ステージに一体的に設けられた請求項11～16のいずれか一項に記載の光学特性計測装置と；備える露光装置である。

【0032】これによれば、パターン形成部材が基板ステージに一体的に設けられた請求項11～16に記載の各光学特性計測装置を備えているので、該光学特性計測装置により投影光学系のベストフォーカス位置を高精度に計測することができる。このベストフォーカス位置の計測結果に基づいてマスクと基板との光学的な位置関係を所望の位置関係に調整することができるので、デフォーカスに起因する露光不良の発生を抑制して高精度な露光を実現することが可能となる。

【0033】請求項18に記載のデバイス製造方法は、リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記リソグラフィ工程で、請求項17に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とする。

【0034】

【発明の実施の形態】以下、本発明の一実施形態を図1～図11に基づいて説明する。図1には、一実施形態に係る露光装置100の概略的な構成が示されている。この露光装置100は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置、すなわちいわゆるスキャニング・ステップである。

【0035】この露光装置100は、光源及び照明光学系を含む照明装置としての照明系10、マスクとしてのレチクルRを保持するレチクルステージRST、投影光学系PL、基板としてのウエハWを保持してXY平面内を自在に移動可能な基板ステージとしてのウエハステージWST、及びこれらを制御する制御系等を備えている。

【0036】前記照明系10は、光源、照度均一化光学系（コリメータレンズ、フライアイレンズ等から成る）、リレーレンズ系、照明視野絞りとしてのレチクルブラインド及びコンデンサレンズ系等（いずれも図1では図示省略）を含んで構成されている。

【0037】前記光源としては、ここでは、一例として、KrFエキシマレーザ光（波長248nm）又はArFエキシマレーザ光（波長193nm）を出力するエキシマレーザ光源が用いられるものとする。

【0038】前記レチクルブラインドは、開口形状が固定の不図示の固定レチクルブラインドと開口形状が可変の可動レチクルブラインド12（図1では図示省略、図2参照）とから構成されている。固定レチクルブラインドは、レチクルRのパターン面の近傍又はその共役面か



ら僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクルR上の長方形スリット状の照明領域(図1における紙面直交方向であるX軸方向に細長く伸び図1における紙面内左右方向であるY軸方向の幅が所定幅の長方形スリット状の照明領域)1ARを規定する長方形開口が形成されている。また、可動レチクルブラインド12は、レチクルRのパターン面に対する共役面に配置され、走査露光時の走査方向(ここでは、Y軸方向とする)及び非走査方向(X軸方向とする)にそれぞれ対応する方向の位置及び幅が可変の開口部を有する。但し、図2では説明を簡単にするために、可動レチクルブラインド12がレチクルRに対して照明系側近傍に配置されているように示されている。

【0039】照明系10によると、光源で発生した露光光としての照明光(以下、「照明光1L」と呼ぶ)は不図示のシャッターを通過した後、照度均一化光学系により照度分布がほぼ均一な光束に変換される。照度均一化光学系から射出された照明光1Lは、リレーレンズ系を介して前記レチクルブラインドに達する。このレチクルブラインドを通過した光束は、リレーレンズ系、コンデンサレンズ系を通過して回路パターン等が描かれたレチクルRの照明領域1ARを均一な照度で照明する。

【0040】なお、可動レチクルブラインド12は、走査露光の開始時及び終了時に主制御装置20によって制御され、照明領域1ARを更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。また、本実施形態では、可動レチクルブラインド12が、後述する空間像計測器による空間像の計測の際の照明領域の設定にも用いられる。

【0041】前記レチクルステージRST上には、レチクルRが、例えば真空吸着(又は静電吸着)により固定されている。レチクルステージRSTは、ここでは、リニアモータ等を含む不図示のレチクルステージ駆動系により、後述する投影光学系PLの光軸AXに垂直なXY平面内で2次的に(X軸方向、Y軸方向及びXY平面に直交するZ軸回りの回転方向( $\theta_z$ 方向)に)微小駆動可能であるとともに、不図示のレチクルベース上をY軸方向に指定された走査速度で移動可能となっている。このレチクルステージRSTは、レチクルRの全面が少なくとも投影光学系PLの光軸AXを横切ることができるだけのY軸方向の移動ストロークを有している。

【0042】レチクルステージRST上には、レチクルレーザ干渉計(以下、「レチクル干渉計」という)13からのレーザビームを反射する移動鏡15が固定されており、レチクルステージRSTのXY面内の位置(Z軸回りの回転方向である $\theta_z$ 方向の回転を含む)はレチクル干渉計13によって、例えば0.5~1nm程度の分解能で常時検出される。ここで、実際には、レチクルステージRST上には走査露光時の走査方向(Y軸方向)に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向(X軸方

向)に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、レチクル干渉計13はY軸方向に少なくとも2軸、X軸方向に少なくとも1軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡15、レチクル干渉計13として示されている。

【0043】レチクル干渉計13からのレチクルステージRSTの位置情報は、ワークステーション(又はマイクロコンピュータ)から成る主制御装置20に送られ、主制御装置20ではレチクルステージRSTの位置情報に基づいてレチクルステージ駆動系を介してレチクルステージRSTを駆動制御する。

【0044】前記投影光学系PLは、レチクルステージRSTの図1における下方に配置され、その光軸AXの方向がZ軸方向とされ、ここでは両側テレセントリックな縮小系であり、光軸AX方向に沿って所定間隔で配置された複数枚のレンズエレメントから成る屈折光学系が使用されている。この投影光学系PLの投影倍率は、ここでは、一例として1/5となっている。このため、照明系10からの照明光1LによってレチクルR上のスリット状照明領域1ARが照明されると、このレチクルRを通過した照明光1Lにより、投影光学系PLを介してそのスリット状照明領域1AR内のレチクルRの回路パターンの縮小像(部分倒立像)が表面にフォトリソが塗布されたウエハW上の前記照明領域1ARに共役な露光領域1Aに形成される。

【0045】前記ウエハステージWSTは、ステージベース16上面に沿って例えば磁気浮上型2次元リニアアクチュエータから成る不図示のウエハステージ駆動系により、XY2次元面内( $\theta_z$ 回転を含む)で自在に駆動されるようになっている。ここで、2次元リニアアクチュエータは、X駆動コイル、Y駆動コイルの他、Z駆動コイルをも有しているため、ウエハステージWSTは、Z、 $\theta_x$ (X軸回りの回転方向)、 $\theta_y$ (Y軸回りの回転方向)の3自由度方向にも微小駆動が可能な構成となっている。

【0046】ウエハステージWST上には、ウエハホルダ25が載置され、このウエハホルダ25によってウエハWが真空吸着(又は静電吸着)によって保持されている。

【0047】なお、ウエハステージWSTに代えて、リニアモータあるいは平面モータ等の駆動系によってXY2次元面内でのみ駆動される2次元移動ステージを用いる場合には、ウエハホルダ25を、Z、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ の3自由度方向に例えばボイスコイルモータ等によって微小駆動されるZ・レベリングテーブルを介してその2次元移動ステージ上に搭載すれば良い。

【0048】前記ウエハステージWST上には、ウエハレーザ干渉計(以下、「ウエハ干渉計」という)31からのレーザビームを反射する移動鏡27が固定され、外部に配置されたウエハ干渉計31により、ウエハステー

10

20

30

40

50

ジWSTのZ方向の除く5自由度方向(X、Y、 $\theta_z$ 、 $\theta_x$ 、及び $\theta_y$ 方向)の位置が例えば0.5~1nm程度の分解能で常時検出されている。

【0049】ここで、実際には、ウエハステージWST上には、走査露光時の走査方向であるY軸方向に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向であるX軸方向に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、ウエハ干渉計31はY軸方向及びX軸方向にそれぞれ複数軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡27、ウエハ干渉計31として示されている。ウエハステージWSTの位置情報(又は速度情報)は主制御装置20に送られ、主制御装置20では前記位置情報(又は速度情報)に基づいて不図示のウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTのXY面内の位置を制御する。

【0050】また、ウエハステージWSTの内部には、投影光学系PLの光学特性の計測に用いられる空間像計測器59を構成する光学系の一部が配置されている。ここで、空間像計測器59の構成について詳述する。この空間像計測器59は、図2に示されるように、ウエハステージWSTに設けられたステージ側構成部分、すなわちパターン形成部材としてのスリット板90、レンズ84、86から成るリレー光学系、光路折り曲げ用のミラー88、送光レンズ87と、ウエハステージWST外部に設けられたステージ外構成部分、すなわちミラーM、受光レンズ89、光電変換素子としての光センサ24、及び該光センサ24からの光電変換信号の信号処理回路42等とを備えている。

【0051】これを更に詳述すると、スリット板90は、図2に示されるように、ウエハステージWSTの一端部上面に設けられた上部が開口した突設部58aに対し、その開口を塞ぐ状態で上方から嵌め込まれている。このスリット板90は、平面視長方形の受光ガラス82の上面に遮光膜を兼ねる反射膜83が形成され、その反射膜83の一部に計測用パターンとしての所定幅(2D)のスリット状の開孔パターン(以下、「スリット」と呼ぶ)22がパターンニングされて形成されている。

【0052】前記受光ガラス82の素材としては、ここでは、KrFエキシマレーザ光、あるいはArFエキシマレーザ光の透過性の良い、合成石英、あるいはホタル石などが用いられる。

【0053】スリット22下方のウエハステージWST内部には、スリット22を介して鉛直下向きに入射した照明光束(像光束)の光路を水平に折り曲げるミラー88を介在させてレンズ84、86から成るリレー光学系(84、86)が配置され、このリレー光学系(84、86)の光路後方のウエハステージWSTの+Y側の側壁に、リレー光学系(84、86)によって所定光路長分だけリレーされた照明光束をウエハステージWSTの外部に送光する送光レンズ87が固定されている。

【0054】送光レンズ87によってウエハステージW

STの外部に送り出される照明光束の光路上には、X軸方向に所定長さを有するミラーMが傾斜角45°で斜設されている。このミラーMによって、ウエハステージWSTの外部に送り出された照明光束の光路が鉛直上方に向けて90°折り曲げられるようになっている。この折り曲げられた光路上に送光レンズ87に比べて大径の受光レンズ89が配置されている。この受光レンズ89の上方には、光センサ24が配置されている。これら受光レンズ89及び光センサ24は、所定の位置関係を保ってケース92内に収納され、該ケース92は取付け部材93を介してベース16の上面に植設された支柱94の上端部近傍に固定されている。

【0055】前記光センサ24としては、微弱な光を精度良く検出することが可能な光電変換素子(受光素子)、例えばフォト・マルチプライヤ・チューブ(PMT、光電子増倍管)などが用いられる。光センサ24の出力信号の信号処理回路42は、増幅器、サンプルホルダ、A/Dコンバータ(通常16ビットの分解能のものが用いられる)などを含んで構成される(図8参照)。本実施形態では、この光センサ24の陰極-陽極間の印加電圧の設定により、その信号感度(検出感度)の設定が行われるようになっている。なお、これについては後述する。

【0056】なお、前述の如く、スリット22は反射膜83に形成されているが、以下においては、便宜上スリット板90にスリット22が形成されているものとして説明を行う。

【0057】上述のようにして構成された空間像計測器59によると、後述する、レチクルRに形成された計測マークの投影光学系PLを介しての投影像(空間像)の計測の際に、投影光学系PLを透過してきた照明光ILによって空間像計測器59を構成するスリット板90が照明されると、そのスリット板90上のスリット22を透過した照明光ILがレンズ84、ミラー88及びレンズ86、送光レンズ87を介してウエハステージWSTの外部に導き出される。そして、そのウエハステージWSTの外部に導き出された光は、ミラーMによって光路が鉛直上方に折り曲げられ、受光レンズ89を介して光センサ24によって受光され、該光センサ24からその受光量に応じた光電変換信号(光量信号)Pが信号処理回路42を介して主制御装置20に出力される。

【0058】本実施形態の場合、計測マークの投影像(空間像)の計測はスリットスキャン方式により行われるので、その際には、送光レンズ87が、受光レンズ89及び光センサ24に対して移動することになる。そこで、空間像計測器59では、所定の範囲内で移動する送光レンズ87を介した光がすべて受光レンズ89に入射するように、各レンズ、及びミラーMの大きさが設定されている。

【0059】このように、空間像計測器59では、スリ

ット板 90、レンズ 84、86、ミラー 88、及び送光レンズ 87により、スリット 22を介した光をウエハステージ WST外に導出する光導出部が構成され、受光レンズ 89及び光センサ 24によって、ウエハステージ WST外へ導出された光を受光する受光部が構成されている。この場合、これら光導出部と受光部とは、機械的に分離されている。そして、空間像計測に際してのみ、光導出部と受光部とは、ミラー Mを介して光学的に接続される。

【0060】すなわち、空間像計測器 59では、光センサ 24がウエハステージ WSTの外部の所定位置に設けられているため、光センサ 24の発熱に起因してレーザ干渉計 31の計測精度等に悪影響を与えたりすることがない。また、ウエハステージ WSTの外部和内部とをライトガイド等により接続していないので、ウエハステージ WSTの外部和内部とがライトガイドにより接続された場合のようにウエハステージ WSTの駆動精度が悪影響を受けることもない。

【0061】勿論、熱の影響を排除できるような場合には、光センサ 24をウエハステージ WSTの内部に設けても良い。なお、空間像計測器 59を構成するスリット板 90上のスリット 22の形状、寸法等、及び空間像計測器 59を用いて行われる空間像計測方法、光学特性計測方法などについては、後に詳述する。

【0062】図 1に戻り、投影光学系 PLの側面には、ウエハ W上のアライメントマーク（位置合わせマーク）を検出するマーク検出系としてのオフアクシス・アライメント系 ALGが設けられている。本実施形態では、このアライメント系 ALGとして、画像処理方式のアライメントセンサ、いわゆる FIA（Field Image Alignment）系が用いられている。このアライメント系 ALGは、図 2に示されるように、アライメント用光源 32、ハーフミラー 34、第 1対物レンズ 36、第 2対物レンズ 38、撮像素子（CCD）40等を含んで構成されている。ここで、光源 32としては、ブロードバンドの照明光を出射するハロゲンランプ等が用いられる。このアライメント系 ALGでは、図 3に示されるように、光源 32からの照明光により、ハーフミラー 34、第 1対物レンズ 36を介してウエハ W上のアライメントマーク Mwを照明し、そのアライメントマーク部分からの反射光を第 1対物レンズ 36、ハーフミラー 34、第 2対物レンズ 38を介して撮像素子 40で受光する。これにより、撮像素子の受光面にアライメントマーク Mwの明視野像が結像される。そして、この明視野像に対応する光電変換信号、すなわちアライメントマーク Mwの反射像に対応する光強度信号が撮像素子 40から主制御装置 20に供給される。主制御装置 20では、この光強度信号に基づき、アライメント顕微鏡 ALGの検出中心を基準とするアライメントマーク Mwの位置を算出するとともに、その算出結果とそのときのウエハ干渉計 31の出力

であるウエハステージ WSTの位置情報とに基づいて、ウエハ干渉計 31の光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマーク Mwの座標位置を算出するようになっている。

【0063】更に、本実施形態の露光装置 100では、図 1に示されるように、主制御装置 20によってオンオフが制御される光源を有し、投影光学系 PLの結像面に向けて多数のピンホール又はスリットの像を形成するための結像光束を、光軸 AXに対して斜め方向より照射する照射系 60aと、それらの結像光束のウエハ W表面での反射光束を受光する受光系 60bとから成る斜入射光式の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）が設けられている。主制御装置 20では、投影光学系 PLにフォーカス変動が生じた場合には、受光系 60b内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系 PLのフォーカス変動に応じて多点焦点位置検出系（60a、60b）にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行うようになっている。なお、本実施形態の焦点位置検出系（60a、60b）と同様の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）の詳細な構成は、例えば特開平 6-283403号公報等に開示されている。

【0064】主制御装置 20では、後述する走査露光時等に、受光系 60bからの焦点ずれ信号（デフォーカス信号）、例えば Sカーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるように、不図示のウエハステージ駆動系を介してウエハステージ WSTの Z軸方向への移動、及び 2次元点に傾斜（すなわち、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 方向の回転）を制御する、すなわち多点焦点位置検出系（60a、60b）を用いてウエハステージ WSTの移動を制御することにより、照明光 ILの照射領域（照明領域 IARと結像関係）内で投影光学系 PLの結像面とウエハ Wの表面とを実質的に合致させるオートフォーカス（自動焦点合わせ）及びオートレベリングを実行する。

【0065】次に、本実施形態の露光装置 100における露光工程の動作について簡単に説明する。

【0066】まず、不図示のレチクル搬送系によりレチクル Rが搬送され、ローディングポジションにあるレチクルステージ RSTに吸着保持される。次いで、主制御装置 20により、ウエハステージ WST及びレチクルステージ RSTの位置が制御され、レチクル R上に形成された不図示のレチクルアライメントマークの投影像（空間像）が空間像計測器 59を用いて後述するようにして計測され（図 2参照）、レチクルパターン像の投影位置が求められる。すなわち、レチクルアライメントが行われる。

【0067】次に、主制御装置 20により、空間像計測器 59がアライメント系 ALGの直下へ位置するように、ウエハステージ WSTが移動され、アライメント系 ALGによって空間像計測器 59の位置基準となるスリ

ット22が検出される。主制御装置20では、このアライメント系ALGの検出信号及びそのときのウエハ干渉計31の計測値、並びに先に求めたレチクルパターン像の投影位置に基づいて、レチクルRのパターン像の投影位置とアライメント系ALGとの相対位置、すなわちアライメント系ALGのベースライン量を求める。

【0068】かかるベースライン計測が終了すると、主制御装置20により、例えば特開昭61-44429号公報などに詳細に開示されるEGA（エンハンスト・グローバル・アライメント）等のウエハアライメントが行われ、ウエハW上の全てのショット領域の位置が求められる。なお、このウエハアライメントに際して、ウエハW上の複数のショット領域のうちの予め定められた所定のサンプルショットのウエハアライメントマークMwがアライメント系ALGを用いて、前述した如くして計測される（図2参照）。

【0069】次いで、主制御装置20では、上で求めたウエハW上の各ショット領域の位置情報及びベースライン量に基づいて、干渉計31、13からの位置情報をモニタしつつ、ウエハステージWSTを第1ショット領域の走査開始位置に位置決めするとともに、レチクルステージRSTを走査開始位置に位置決めして、その第1ショット領域の走査露光を行う。

【0070】すなわち、主制御装置20では、レチクルステージRSTとウエハステージWSTとのY軸方向逆方向きの相対走査を開始し、両ステージRST、WSTがそれぞれの目標走査速度に達すると、露光光ELによってレチクルRのパターン領域が照明され始め、走査露光が開始される。この走査露光の開始に先立って、光源の発光は開始されているが、主制御装置20によってレチクルブラインドを構成する可動ブラインドの各ブレードの移動がレチクルステージRSTの移動と同期制御されているため、レチクルR上のパターン領域外への露光光ELの照射が遮光されることは、通常のスキヤニング・ステッパと同様である。

【0071】主制御装置20では、特に上記の走査露光時にレチクルステージRSTのY軸方向の移動速度VrとウエハステージWSTのX軸方向の移動速度Vwとが投影光学系PLの投影倍率に応じた速度比に維持されるようにレチクルステージRST及びウエハステージWSTを同期制御する。

【0072】そして、レチクルRのパターン領域の異なる領域が紫外パルス光で逐次照明され、パターン領域全面に対する照明が完了することにより、ウエハW上の第1ショット領域の走査露光が終了する。これにより、レチクルRの回路パターンが投影光学系PLを介して第1ショット領域に縮小転写される。

【0073】こうして第1ショット領域の走査露光が終了すると、ウエハステージWSTを第2ショット領域の走査開始位置へ移動させるショット間のステッピング動

作を行う。そして、その第2ショット領域の走査露光を上述と同様にして行う。以後、第3ショット領域以降も同様の動作を行う。

【0074】このようにして、ショット間のステッピング動作とショットの走査露光動作とが繰り返され、ステップ・アンド・スキャン方式でウエハW上の全てのショット領域にレチクルRのパターンが転写される。

【0075】ここで、上記の走査露光中には、投影光学系PLに一体的に取付けられたフォーカスセンサ（60a、60b）を用いて、前述したオートフォーカス・オートレベリングが行われる。

【0076】ところで、上記の走査露光中に、レチクルRのパターンとウエハW上のショット領域に既に形成されたパターンとが正確に重ね合わせられるためには、投影光学系PLの光学特性やベースライン量が正確に計測されていること、及び投影光学系PLの光学特性が所望の状態に調整されていることなどが重要である。

【0077】本実施形態では、上記の結像特性の計測に、空間像計測器59が用いられる。以下、この空間像計測器59による空間像計測、及び投影光学系PLの光学特性の計測等について詳述する。

【0078】図2には、空間像計測器59を用いて、レチクルRに形成された計測マークの空間像が計測されている最中の状態が示されている。レチクルRとしては、空間像計測専用のもの、あるいはデバイスの製造に用いられるデバイスレチクルに専用の計測マークを形成したものなどが用いられる。これらのレチクルの代わりに、レチクルステージRSTにレチクルと同材質のガラス素材から成る固定のマーク板（レチクルフィデュシャルマーク板とも呼ばれる）を設け、このマーク板に計測マークを形成したものを用いても良い。

【0079】ここで、レチクルRには、図2に示されるように、所定の箇所にY軸方向に周期性を有するラインアンドスペースマークから成る計測マークPMが形成されているものとする。また、空間像計測器59のスリット板90には、図4（A）に示されるように、X軸方向に伸びる所定幅2Dのスリット22が形成されているものとする。所定幅2Dは、ここでは、解像限界のデューティ比1：1のラインアンドスペースパターンのハーフピッチ程度、例えば $2D=0.2\mu m$ とされているものとする。なお、以下では、ラインアンドスペースを適宜「L/S」と略述する。

【0080】空間像の計測に当たり、主制御装置20により、可動レチクルブラインド12が不図示のブラインド駆動装置を介して駆動され、レチクルRの照明光ILの照明領域が計測マークPM部分のみに規定される（図2参照）。この状態で、照明光ILがレチクルRに照射されると、図2に示されるように、計測マークPMによって回折、散乱した光（照明光IL）は投影光学系PLにより屈折され、該投影光学系PLの像面に計測マーク

PMの空間像(投影像)PM'が形成される。このとき、ウエハステージWSTは、空間像計測器59のスリット板90上のスリット22の+Y側(又は-Y側)に前記空間像PM'が形成される位置に設定されているものとする。このときの空間像計測器59の平面図が図4(A)に示されている。

【0081】そして、主制御装置20により、ウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTが図4

(A)中に矢印Fで示されるように+Y方向に駆動されると、スリット22が空間像PM'に対してY軸方向に沿って走査される。この走査中に、スリット22を通過する光(照明光IL)がウエハステージWST内の光導出部、及び受光レンズ89を介して光センサ24で受光され、その光電変換信号が信号処理回路42を介して主制御装置20に供給される。主制御装置20では、その光電変換信号に基づいて空間像PM'に対応する光強度分布を計測する。

【0082】図4(B)には、上記の空間像計測の際に得られる光電変換信号(光強度信号)Pの一例が示されている。

【0083】この場合、空間像PM'はスリット22の走査方向(Y軸方向)の幅(2D)の影響で像が平均化する。

【0084】従って、スリットを $p(y)$ 、空間像の強度分布を $i(y)$ 、観測される光強度信号を $m(y)$ とすると、空間像の強度分布 $i(y)$ と観測される強度信号 $m(y)$ の関係は次の(1)式で表すことができる。この(1)式において、強度分布 $i(y)$ 、強度信号 $m(y)$ の単位は単位長さ当たりの強度とする。

【0085】

【数1】

$$m(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(y-u) \cdot i(u) du \quad \dots(1)$$

【0086】

【数2】

$$p(y) = \begin{cases} 1(|y| \leq D) \\ 0(|y| > D) \end{cases} \quad \dots(2)$$

【0087】すなわち、観測される強度信号 $m(y)$ はスリット $p(y)$ と空間像の強度分布 $i(y)$ のコンボリューションになる。

【0088】従って、計測精度の面からは、スリット幅2Dは、小さいほど良く、本実施形態のようにPMTを光センサ24として用いる場合には、スリット幅が非常に小さくなくても走査速度を遅くして計測に時間をかければ光量(光強度)の検出は可能である。しかしながら、現実には、スルーホットの面から空間像計測時の走査速度には、一定の制約があるため、スリット幅2Dがあまりにも小さいと、スリット22を透過する光量が小

さくなり過ぎて、計測が困難となってしまふ。

【0089】発明者がシミュレーション及び実験等により得た知見によれば、スリット幅2Dの最適値は、露光装置の解像限界ピッチ(デューティ比1:1のL/Sパターンのピッチ)の半分程度となることが確認されたので、本実施形態では、そのように設定したものである。

【0090】上述した空間像計測器59及びそれを用いた空間像計測方法は、a. ベストフォーカス位置の検出、b. XY面内でのパターン像の結像位置の検出、c. アライメント系ALGのベースライン計測等に用いられる。

【0091】本実施形態の露光装置100におけるc. ベースライン計測については既に説明した。また、b. XY面内でのパターン像の結像位置の検出では、比較的ピッチの狭い繰返しパターンと、孤立線や比較的ピッチの広い繰返しパターンとで、特に計測方法を変更する必要がなく、また、本発明との関連が薄いため、以下、上記a. ベストフォーカス位置の検出について、説明する。

20 【0092】このベストフォーカス位置の検出は、例えば投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面(像面)の検出などの目的に用いられる。

【0093】本実施形態では、一例として次のようにして投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行う。

30 【0094】このベストフォーカス位置の検出には、例えば、ウエハ上でライン幅0.15 $\mu$ m(レチクル上で0.75 $\mu$ m)、ピッチ1.5 $\mu$ m(デューティ比1:9)のL/Sマークが、計測マークPMとして形成されたレチクルRが用いられる。

【0095】まず、不図示のレチクルロードにより、レチクルステージRST上にレチクルRがロードされる。次に、主制御装置20では、投影光学系PLの視野内でベストフォーカス位置を計測すべき所定点(ここでは投影光学系PLの光軸上)にレチクルR上の計測マークPMが位置決めされるように、レチクルステージRSTを移動する。

【0096】次に、主制御装置20では、照明光ILが計測マークPM部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルRに照射して、前述と同様にして、ウエハステージWSTをY軸方向に走査しながら空間像計測器59を用いて、計測マークPMの空間像計測を前述と同様にスリットスキャン方式により行う。この際、主制御装置20では、スリット板90のZ軸方向の位置(すなわち、ウエハステージWSTのZ位置)を例えば0.1 $\mu$ mピッチで15ステップ程度)変化させつつ、複数回繰返し、各回の光強度信号(光電変換信号)を内部メモリに記憶する。ステップ範囲は、例えば設計上のベストフォーカ

ス位置をほぼ中心とする範囲で行われる。

【0097】ここで、上述した空間像計測に際して、最初のZ位置でスリット板90が走査され、計測マークPMの空間像に対応する光強度信号を取り込んだ時点で、光センサ24の後段の信号処理回路42のダイナミックレンジを最大限有効に生かすような検出感度の設定(校正)を行うが、この点については後述する。

【0098】この場合において、例えば、計測マークがデューティ比1:1のL/Sマーク(L/Sパターン)の場合、上記の光強度信号をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と0次周波数成分の振幅比であるコントラストを求める。このコントラストはフォーカス位置によって敏感に変化するので強度信号からベストフォーカス位置を決定するのに便利である。しかし、デューティ比1:9のL/Sパターン(疑似孤立線)から成る計測マークPMの場合はパターンの繰り返しピッチが大きいため1次周波数成分を用いるフォーカス検出は精度が悪い。これは鈍いパターンのDOFが大きいためである。しかしながら、高い次数の周波数成分の振幅は十分に大きくはないので高い次数の単一周波数成分の振幅のみでフォーカス検出を行ってもやはり精度が悪い。

【0099】そこで、本実施形態では、主制御装置20は、前記繰り返しにより得られた複数の光強度信号(光電変換信号)に基づいて、以下の第1、第2の方法によりベストフォーカス位置を算出する。

#### 【0100】a. 第1の方法

この第1の方法は、孤立線(又は疑似孤立線の1本のラインパターン)の空間像に対応する光強度信号に対応する領域を、設計上のパターンのXY面内での結像位置(中心位置)を中心とする設計線幅の中心部領域(第1の領域)と、その両側の周辺部領域(第2の領域)に分割し、両者の面積比を評価量として、ベストフォーカス位置を求める方法である。以下、この第1の方法の検出原理について、図5及び図6に基づいて説明する。

【0101】図5(A)には、上記の計測マークPMと同一サイズの計測マーク及びスリット幅を設定したシミュレーションの結果得られたベストフォーカス状態におけるスリット透過光強度が横軸をスリット22のY位置(又はウエハステージWSTのY位置)として示され、図5(B)には1 $\mu$ mデフォーカスした状態におけるスリット透過光強度が横軸をスリット22のY位置(又はウエハステージWSTのY位置)として示されている。

【0102】図5(A)において、光強度信号P<sub>1</sub>と横軸とで囲まれる計測マークPMの1本のラインパターンの設計上のXY面内での結像位置(中心位置)を中心とする設計線幅の領域の面積A=A<sub>1</sub>と、その両側の領域の面積B=B<sub>1</sub>(=b<sub>1</sub>+b<sub>2</sub>)の面積比を $\alpha_1$ とすると、 $\alpha_1$ は、次式(3)で表わされる。

$$\alpha_1 = A_1 / B_1 \quad \dots\dots (3)$$

【0103】一方、図5(B)において、光強度信号P<sub>2</sub>と横軸とで囲まれる計測マークPMの1本のラインパターンの設計上のXY面内での結像位置(中心位置)を中心とする設計線幅の領域の面積A=A<sub>2</sub>と、その両側の領域の面積B=B<sub>2</sub>(=b<sub>3</sub>+b<sub>4</sub>)の面積比を $\alpha_2$ とすると、 $\alpha_2$ は、次式(4)で表わされる。

$$\alpha_2 = A_2 / B_2 \quad \dots\dots (4)$$

【0104】図5(A)と図5(B)とを比較すると明らかのように、 $\alpha_1 > \alpha_2$ である。

【0105】従って、次式(5)で表わされる面積比 $\alpha$ を評価量として用いれば、ベストフォーカス位置を精度良く検出することが可能となる。

$$\text{面積比 } \alpha = A / B \quad \dots\dots (5)$$

【0106】上述した面積比 $\alpha$ を評価量として、ベストフォーカス位置を求める方法は、種々考えられるが、一例として、図6に示されるように、スリット板90の光軸方向位置(Z位置)毎に得られた光強度信号に基づいて算出された面積比 $\alpha$ を、横軸をZ位置とする直交座標系上にプロットする(図6における×印参照)。そして、この各プロット点を曲線近似(カーブフィット)する。例えば4次程度の近似曲線を最小二乗法によって求める。そして、その近似曲線を適当な閾値レベル(スライスレベル)SLでスライスし、そのスライスレベルSLと近似曲線との交点J、Kを求め、それらの交点J、Kの中点(点J、Kのそれぞれから距離L/2の点)Oを通る縦軸(評価量 $\alpha$ の軸)と平行な軸との交点Gを近似曲線のピーク点とし、該ピーク点Gに対応する横軸の座標Z<sub>0</sub>をベストフォーカス位置とする。

【0107】前述の如く、ベストフォーカス位置の計測に際しては、通常約0.1 $\mu$ mのピッチで15ステップ程度、Z位置を変化させてスリットスキャン方式で空間像計測が行われる。この場合、計測再現性を良好にするためには、なるべく多くの計測点(Z位置)における情報からピーク位置を求めることが重要である。図6では、13点における面積比 $\alpha$ からベストフォーカス位置を求める場合が一例として図示されている。

#### 【0108】b. 第2の方法

この第2の方法は、孤立線(又は疑似孤立線の1本のラインパターン)の空間像に対応する光強度信号に対応する領域を、所定の閾値レベルを境として2分割し、閾値レベルの上側の領域(第1の領域)と下側の領域(第2の領域)の面積比を評価量として、ベストフォーカス位置を求める方法である。以下、この第2の方法の検出原理について、図7(A)、図7(B)に基づいて説明する。

【0109】図7(A)、図7(B)には、図5

(A)、図5(B)とそれぞれ全く同一のシミュレーションの結果得られたスリット透過光強度が横軸をスリット22のY位置(又はウエハステージWSTのY位置)として示されている。

【0110】図7(A)において、光強度信号 $P_1$ と横軸とで囲まれる領域のうち、所定のスライスレベル(閾値レベル) $SL'$ を境として2分割した上側の領域の面積 $C=C_1$ と、下側の領域の面積 $E=E_1$ との面積比を $\gamma_1$ とすると、 $\gamma_1$ は、次式(6)で表わされる。

$$\gamma_1 = C_1 / E_1 \quad \cdots \cdots (6)$$

【0111】ここで、スライスレベル $SL'$ は、例えばベストフォーカス状態におけるピーク点における光強度を予め実験等で求め、例えばその50%程度のレベルに設定される。

【0112】一方、図7(B)において、光強度信号 $P_1$ と横軸とで囲まれる領域のうち、所定のスライスレベル(閾値レベル) $SL'$ の上側の領域の面積 $C=0$ であるから、それとスライスレベル(閾値レベル) $SL'$ の下側の面積 $E=E_2$ との面積比を $\gamma_2$ とすると、 $\gamma_2$ は、次式(7)で表わされる。

$$\gamma_2 = 0 / E_2 = 0 \quad \cdots \cdots (7)$$

この場合、明らかに、 $\gamma_1 > \gamma_2$ である。

【0113】従って、次式(8)で表わされる面積比 $\gamma$ を評価量として用いれば、ベストフォーカス位置を精度良く検出することが可能となる。

$$\text{面積比 } \gamma = C / E \quad \cdots \cdots (8)$$

【0114】この場合も、面積比 $\gamma$ を評価量として、ベストフォーカス位置を求める際には、前述したスリット板90の光軸方向位置(Z位置)毎に得られた光強度信号に基づいて算出された面積比 $\gamma$ を、横軸をZ位置とする直交座標系上にプロットし、各プロット点を曲線近似し、その近似曲線のピーク点を前述したスライス中点法に基づいて求め、そのピーク点に対応する横軸の座標をベストフォーカス位置とする方法を、そのまま採用することができ

【0115】また、投影光学系PLの像面形状の検出は、次のようにして行うことができる。

【0116】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルRがロードされる。次に、主制御装置20では、投影光学系PLの視野内の第1の検出点(ここでは、投影光学系PLの光軸上)に計測マークPMが位置決めされるように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測マークPM部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルRに照射して、前述と同様に、スリットスキャン方式により空間像計測器59を用いて計測マークPMの空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置 $Z_1$ の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0117】投影光学系PLの視野内の第1の検出点でのベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置20では、投影光学系PLの視野内の第2の検出点に

計測マークPMが位置決めされるように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測マークPM部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測マークPMの空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置 $Z_2$ の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0118】以後、主制御装置20では、上記と同様に、投影光学系PLの視野内の検出点を変更しつつ、計測マークPMについて空間像の計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を繰り返す。

【0119】これにより得られた各ベストフォーカス位置 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、……、 $Z_n$ に基づいて、所定の統計的处理を行うことにより、投影光学系PLの像面形状を算出する。このとき、像面形状とは別に像面湾曲をも算出しても良い。なお、ここではレチクルRを移動してベストフォーカス位置を計測すべき複数点にそれぞれ計測マークPMを配置するものとしたが、レチクルRに複数の計測マークPMを形成しておき、可動レチクルブラインド12によって各計測マークPMに照明光ILを順次照射して上記各点でのベストフォーカス位置を検出するようにしても良い。

【0120】投影光学系PLの像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点(すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点)におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、このような手法により、像面形状を容易にかつ正確に求めることができる。

【0121】ところで、本実施形態のように、フォト・マルチプライヤ・チューブ(PMT、光電子増倍管)を光センサ24として用いる場合、空間像計測に際しては、計測マークとして例えばデューティ比1:1のL/Sパターンを用いるような場合であっても、光センサ24及びその信号処理回路を含む信号処理系の信号感度(検出感度)をダイナミックレンジを有効に生かせるように設定することが望ましい。特に、本実施形態のように、計測マークとしてデューティ比1:9の擬似孤立線を用いる場合には、上記のデューティ比1:1のL/Sパターンの場合に比べて基本波の振幅が小さくなる傾向があり、計測精度が劣るため、上記の信号感度の調整が重要である。

【0122】次に、本実施形態の露光装置100で行われる、信号光(スリット透過光)を処理する信号処理系の信号感度の設定方法(校正方法)について説明する。

【0123】一般に、PMTの感度は印加電圧によって設定される。すなわち、電子増倍部(ダイノード部)のダイノードの段数を $n$ 、陽極一陰極間の印加電圧を $V$ とすると、感度に対応する電流増倍率 $\mu$ は、印加電圧 $V$ の $n$ 乗にほぼ比例する。そして、PMTの感度設定は後段



の信号処理回路のダイナミックレンジを無駄無く使えるような陽極感度となるように設定される。

【0124】しかしながら、本実施形態の場合、空間像計測がベストフォーカス位置の検出を目的とするため、計測時には、ベストフォーカス位置が不明である。このため、その感度設定には工夫が必要になる。すなわち、強度信号のピークレベルは、ベストフォーカス時に最大となるが、ベストフォーカス位置が不明のため、そのピークレベルを高めに見込んで印加電圧を設定すると、ダイナミックレンジを最大限有効に利用してA/Dコンバータの分解能（通常は16ビット）最大限利用することが困難である。一方、ピークレベルを低めに見込んで印加電圧を設定すると、ダイナミックレンジを超えてしまう可能性が高いからである。

【0125】そこで、本実施形態の露光装置100では、主制御装置20が、デフォーカス状態（あるいはベストフォーカス位置が不明な状態）で得た光強度信号（光電変換信号）に基づいてベストフォーカス時の最大ピーク値が、信号処理回路42のダイナミックレンジ内にほぼ収まるように印加電圧Vを設定することとしている。以下、これについて具体的に説明する。

【0126】図8には、信号光（スリット透過光）を処理する信号処理系50の構成がブロック図にて簡略化して示されている。

【0127】この信号処理系50は、光センサ（PMT）24と、オペアンプ回路から成る増幅回路44、サンプルホルダ46、A/Dコンバータ48等を含む信号処理回路42とを備えている。光センサ24の陽極陰極間には、高電圧電源52から高電圧が印加されている。そして、主制御装置20により、A/Dコンバータ48の出力に基づいて以下の原理に従って高電圧電源52の印加電圧が設定され、これによってこの信号処理系50の信号感度が設定されるようになっている。

【0128】図9（A）～図9（C）には、擬似孤立線パターン空間像の強度信号が、フォーカス位置に応じて変化する様子が模式的に示されている。これらの図は、スリット幅（2D）が十分に小さい（ほぼ無限小）である場合の例を示す。図9（A）は、ベストフォーカス状態であり、図9（B）、図9（C）の順にデフォーカス量が増加している。デフォーカス量によらず、信号光（スリット透過光）の総量（積算光量）は一定である筈であるから、図9（A）～図9（C）において、各山の面積s並びに総面積Sは、いずれも同一値となる筈で\*

$$PEAK = SA / MARK = SB / MARK \quad \cdots (12)$$

【0135】上式（12）により、有限の幅を有するスリット22の走査により得られた光電変換信号の1山分の積分値と計測マークの空間像PM'の走査方向の幅（設計値）とに基づいて、スリット22の幅が十分小的时候（ベストフォーカス状態にほぼ近いとき）の信号ピーク値を算出することができる。この式（12）は、上記

\*ある。ここでは、山が5つあるので、積算光量 $S = 5 \times s$ である。また、信号取り込み幅は、5ピッチ分なので、ピッチをpとして、5pである。図9（A）～図9（C）において、信号強度の平均値aveはいずれも等しく一定値（ $5s / 5p = s / p$ ）となる（図9（D）参照）。そこで、不明のフォーカス位置で得られる信号の平均値が目標値になるまで印加電圧Vを調整する。

【0129】図9（A）より、設計上の線幅をwとして、

$$PEAK = s / w \quad \cdots (9)$$

一方、

$$s = ave \times p \quad \cdots (10)$$

である。

【0130】従って、次式が成立する。

$$PEAK = s / w = ave \times p / w \quad \cdots (11)$$

【0131】すなわち、目標とする平均値aveにより擬似孤立線の場合のベストフォーカスにおけるピーク値PEAKは上式（11）で換算される。従って、上式（11）によって算出されるピーク値PEAKが、信号処理回路42のダイナミックレンジ内にほぼ収まるように印加電圧Vを決定することにより、ダイナミックレンジを最大限有効に活用した信号感度の設定が可能となる。

【0132】しかるに、スリットは現実には有限の幅を有するので、現実には、上記のような設定は、特別の場合（例えばスリット幅（0.2μm）とライン幅とが一致したような場合）以外は、適用はできないものと考えられる。スリットが有限の幅を有する場合、スリットの幅で信号は鈍る。ダイナミックレンジを有効活用するには、鈍る前のピークに鈍った信号のピーク値を合わせる必要がある。そこで、以下では、スリット幅が十分小のときの信号ピーク値に信号が鈍った時の信号ピークを一致させるための方法について説明する。

【0133】まず、図10（A）に示されるように、対象マークの空間像PM'の走査方向の幅MARKがスリット22の幅2Dよりも大きい場合について説明する。

【0134】図10（B）には、スリット幅が十分小さい（無限小）の空間像PM'の強度信号が示され、図10（C）には、スリット幅が2Dが有限の場合の空間像PM'の強度信号が示されている。これらの図において、ピーク値をとるとPEAKとすると、面積SA＝面積SBと近似することができる。従って、次式（12）が成立する。

式（11）のs、wをそれぞれSB、MARKに置き換えたものとみることができ、実質的には等価である。すなわち、光電変換信号の1山分の積分値（面積）をマーク幅で割ることにより、スリット幅が十分小の時のピーク値PEAKを算出することができる。従って、式（12）に基づいて算出したピーク値PEAKが信号処理回



路42のダイナミックレンジ内にほぼ収まるように印加電圧Vを決定することにより、ダイナミックレンジを最大限有効に活用した信号感度の設定が可能となる。

【0136】次に、図11(A)に示されるように、対象マークの空間像PM'の走査方向の幅がスリットの幅2Dよりも小さい場合について説明する。

$$\text{PEAK} = \text{SC} / \text{MARK} = \text{SD} / 2D \quad \dots\dots (13)$$

【0138】上式(13)により、有限の幅を有するスリット22の走査により得られた光電変換信号の1山分の積分値とスリット幅2Dとに基づいて、スリット22の幅が十分小の時(ベストフォーカス状態にほぼ近いとき)の信号ピーク値を算出することができる。すなわち、光電変換信号の1山分の積分値(面積)をスリット幅2Dで割ることにより、スリット幅が十分小の時のピーク値PEAKを算出することができる。従って、式

(13)に基づいて算出したPEAKが信号処理回路42のダイナミックレンジ内にほぼ収まるように印加電圧Vを決定することにより、ダイナミックレンジを最大限有効に活用した信号感度の設定が可能となる。

【0139】以上の関係から明らかなように、有限の幅を有するスリット22の走査により得られた光電変換信号の1山分の積分値を、計測マークの空間像PM'の線幅(設計値:計測マークの線幅×投影倍率)とスリット幅2Dのうちの大きい方の寸法で除した値に基づいて、信号処理系50のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように信号処理系50の信号感度を設定することが可能となる。

【0140】なお、上で説明した信号感度(検出感度)の設定手法は、PMTを光センサとして用いる場合に限らず、他の光電変換素子の検出感度の設定、例えばその光電変換素子の出力増幅部を構成するアンプのゲインを設定する場合にも適用することが可能である。

【0141】これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、主制御装置20によって、計測処理装置、信号感度設定装置、及び算出装置が構成され、この主制御装置20と空間像計測装置59とによって光学特性計測装置が構成されている。

【0142】以上詳細に説明したように、本実施形態の露光装置100によると、照明系10により計測マークPMが照明され、投影光学系PLを介してその像面上に計測マークPMの空間像PM'が形成される。この状態で、主制御装置20では、空間像計測器59を用いて、スリット板90のZ位置を所定ピッチで変化させて、各Z位置についてスリットスキャン方式の空間像計測を実行する。すなわち、主制御装置20では、空間像PM'に対してスリット22が相対的に走査されるようスリット板90を走査するとともに、光センサ24からの光電変換信号に基づいて空間像PM'に対応する光強度分布を計測する、そして、主制御装置20では、上記の計測によりスリット板90のZ位置毎に得られた光電変換信

\*【0137】図11(B)には、スリット幅が十分小さい(無限小)の空間像PM'の強度信号が示され、図11(C)には、スリット幅2Dが有限の場合の空間像PM'の強度信号が示されている。これらの図において、ピーク値とともにPEAKとすると、次式(13)が成立する。

号の波形とスリット板90の走査軸とで囲まれる領域を、投影光学系PLのベストフォーカス位置に近いことを示す第1の領域(A又はC)と、ベストフォーカス位置に遠いことを示す第2の領域(B又はE)とに分け、第1の領域と第2の領域との面積比( $\alpha$ 又は $\gamma$ )を評価量としてベストフォーカス位置を算出する。

【0143】このため、空間像の強度信号(光電変換信号)をフーリエ変換等を行うことなく、得られた各光電変換信号の波形とスリット板90(スリット22)の走査軸とが囲む領域を前述した基準で2つに分けるだけで、それら2つの領域の面積比により、計測マークの種類によらず、すなわち比較的小さな繰り返し周期のL/Sマークは勿論、孤立線や擬似孤立線から成る計測マークを用いても、投影光学系PLのベストフォーカス位置を高精度に計測することが可能となる。

【0144】また、本実施形態の露光装置100で行われる信号処理系50の信号感度設定方法によると、投影光学系PLの物体面上で例えばX軸方向に伸びる所定線幅の線状パターン(計測マーク)PMを介して照明光ILを投影光学系PLを介して像面上に照射し、像面上で例えばX軸方向に伸びる所定幅のスリット22を、例えばY軸方向に沿って照明光ILに対して走査するとともに、スリット22を介した照明光ILを光センサ24で受光し該受光した光の強度に応じた光電変換信号に変換する。そして、光電変換信号の積分値に基づいて、前述したような方向により、信号処理系50のダイナミックレンジを最大限有効に活用できるように信号処理系50の信号感度を設定する。このように、信号処理系のダイナミックレンジが最大限有効に活用できるように信号感度が設定される結果、高い分解能での照明光ILの強度分布、上記実施形態の場合は、計測マークPMの空間像PM'に対応する光強度分布の計測が可能となる。

【0145】また、本実施形態の露光装置100によると、スリット板90がウエハステージWSTに一体的に設けられた空間像計測装置59を備えているので、主制御装置20では、該空間像計測装置59を用いて投影光学系PLのベストフォーカス位置を高精度に計測することができる。そして、このベストフォーカス位置の計測結果に基づいて、例えば多点焦点位置検出系(60a, 60b)の出力の校正情報の設定(フォーカスオフセットの設定や、いわゆるフォーカスキャリブレーション)を行い、結果的に走査露光時のレチクルRとウエハWとの光学的な位置関係を所望の位置関係に調整することが

できるので、デフォーカスに起因する露光不良の発生を抑制して高精度な露光を実現することが可能となる。

【0146】なお、上記各実施形態では、本発明がステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、マスクと基板とを静止した状態でマスクのパターンを基板に転写するとともに、基板を順次ステップ移動させるステップ・アンド・リピート型の露光装置にも本発明は適用することができる。

【0147】また、上記各実施形態では、本発明が半導体製造用の露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置や、薄膜磁気ヘッド、撮像素子、マイクロマシン、DNAチップ、及びレチクルやマスクなどを製造するための露光装置などにも本発明は広く適用できる。

【0148】また、上記各実施形態では、露光用照明光としてKrFエキシマレーザ光(248nm)、ArFエキシマレーザ光(193nm)などを用いる場合について説明したが、これに限らず、g線(436nm)、i線(365nm)、F<sub>2</sub>レーザ光(157nm)、銅蒸気レーザ、YAGレーザの高調波等を露光用照明光として用いることができる。

【0149】また、上記各実施形態では、投影光学系として縮小系かつ屈折系を用いる場合について説明したが、これに限らず、投影光学系として等倍あるいは拡大系を用いても良いし、屈折系、反射屈折系、あるいは反射系のいずれを用いても良い。

【0150】なお、複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系PLを露光装置本体に組み込み光学調整をするとともに、多数の機械部品からなるレチクルステージRSTやウエハステージWSTを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、更に総合調整(電気調整、動作確認等)をすることにより本実施形態の露光装置100を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

【0151】《デバイス製造方法》次に上述した露光装置100をリソグラフィ工程で使用したデバイスの製造方法の実施形態について説明する。

【0152】図12には、デバイス(ICやLSI等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン等)の製造例のフローチャートが示されている。図12に示されるように、まず、ステップ201(設計ステップ)において、デバイスの機能・性能設計(例えば、半導体デバイスの回路設計等)を行い、その機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップ202(マスク製作ステップ)において、設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。一方、ステップ203(ウエハ製造ステップ)において、

シリコン等の材料を用いてウエハを製造する。

【0153】次に、ステップ204(ウエハ処理ステップ)において、ステップ201～ステップ203で用意したマスクとウエハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウエハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ205(デバイス組立てステップ)において、ステップ204で処理されたウエハを用いてデバイス組立てを行う。このステップ205には、ダイシング工程、ボンディング工程、及びパッケージング工程(チップ封入)等の工程が必要に応じて含まれる。

【0154】最後に、ステップ206(検査ステップ)において、ステップ205で作成されたデバイスの動作確認テスト、耐久テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にデバイスが完成し、これが出荷される。

【0155】図13には、半導体デバイスにおける、上記ステップ204の詳細なフロー例が示されている。図13において、ステップ211(酸化ステップ)においてはウエハの表面を酸化させる。ステップ212(CVDステップ)においてはウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ213(電極形成ステップ)においてはウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ214(イオン打ち込みステップ)においてはウエハにイオンを打ち込む。以上のステップ211～ステップ214それぞれは、ウエハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

【0156】ウエハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ215(レジスト形成ステップ)において、ウエハに感光剤を塗布する。引き続き、ステップ216(露光ステップ)において、上で説明したリソグラフィシステム(露光装置)及び露光方法によってマスクの回路パターンをウエハに転写する。次に、ステップ218(エッチングステップ)において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ219(レジスト除去ステップ)において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。

【0157】これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウエハ上に多重に回路パターンが形成される。

【0158】以上説明した本実施形態のデバイス製造方法を用いれば、露光工程(ステップ216)において上記実施形態の露光装置が用いられるので、デフォーカスに起因する露光不良の発生を防止して、精度良くレチクルのパターンをウエハ上に転写することができる。この結果、高集積度のデバイスの生産性(歩留まりを含む)を向上させることが可能になる。

## 【0159】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の光学特性計測方法及び本発明の光学特性計測装置によれば、計測マークの種類によらず、投影光学系のベストフォーカス位置を高精度に計測することができるという効果がある。

【0160】また、本発明の信号感度設定方法によれば、信号処理系の分解能を最大限有効に利用して精度良く光強度分布を計測することを可能にするという効果がある。

【0161】また、本発明の露光装置によれば、デフォーカスに起因する露光不良の発生を抑制して高精度な露光を実現することができるという効果がある。

【0162】また、本発明のデバイス製造方法によれば、デバイスの生産性を向上させることができるという効果がある。

## 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態に係る露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】図1の空間像計測器及びアライメント顕微鏡の内部構成を示す図である。

【図3】アライメント顕微鏡によりウエハ上のアライメントマークを検出している様子を示す図である。

【図4】図4(A)は、空間像の計測に際してスリット板上に空間像PM'が形成された状態の空間像計測器を示す平面図、図4(B)はその空間像計測の際に得られる光電変換信号(光強度信号)Pの一例を示す線図である。

【図5】ベストフォーカス位置の検出のための第1の方法を説明するための図であって、図5(A)は、シミュレーションの結果得られたベストフォーカス状態におけるスリット透過光強度を横軸をスリットのY位置として示す図、図5(B)は1 $\mu$ mデフォーカスした状態におけるスリット透過光強度を横軸をスリットのY位置として示す図である。

【図6】面積比を評価量として、ベストフォーカス位置\*

\*を求める方法を説明するための図である。

【図7】ベストフォーカス位置の検出のための第2の方法を説明するための図であって、図7(A)は、シミュレーションの結果得られたベストフォーカス状態におけるスリット透過光強度を横軸をスリットのY位置として示す図、図7(B)は1 $\mu$ mデフォーカスした状態におけるスリット透過光強度を横軸をスリットのY位置として示す図である。

【図8】信号光(スリット透過光)を処理する信号処理系の構成を簡略化して示すブロック図である。

【図9】図9(A)～図9(D)は、スリット幅(2D)が十分に小さい(ほぼ無限小)場合に信号感度を設定する方法を説明するための図である。

【図10】図10(A)～図10(C)は、スリット幅(2D)が有限であり、マークの空間像の幅がスリット幅より広い場合に、信号感度を設定する方法を説明するための図である。

【図11】図11(A)～図11(C)は、スリット幅(2D)が有限であり、マークの空間像の幅がスリット幅より狭い場合に、信号感度を設定する方法を説明するための図である。

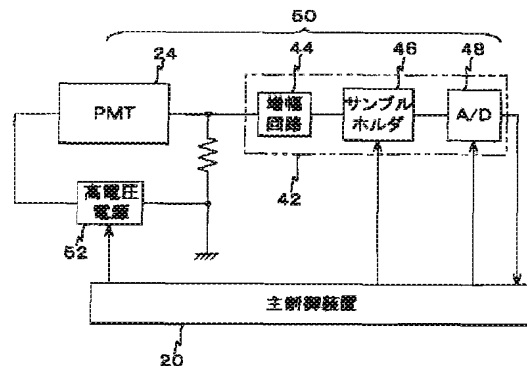
【図12】本発明に係るデバイス製造方法の実施形態を説明するためのフローチャートである。

【図13】図12のステップ204の詳細を示すフローチャートである。

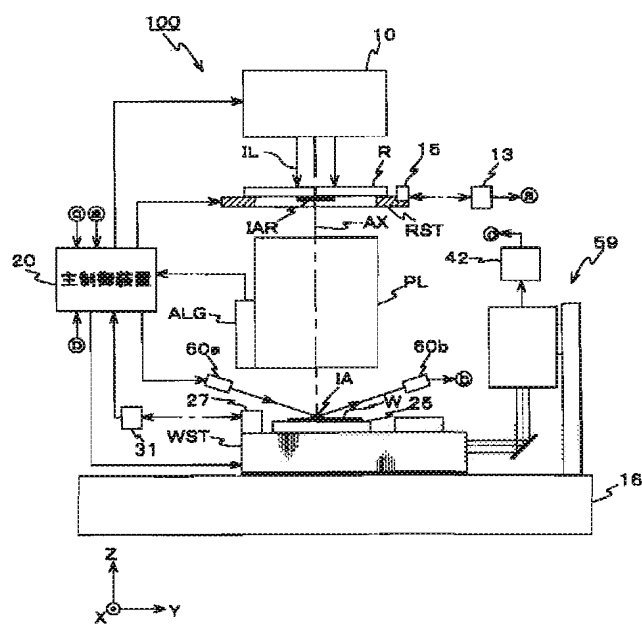
## 【符号の説明】

10…照明系(照明装置)、20…主制御装置(計測処理装置、算出装置、信号感度設定装置、光学特性計測装置の一部)、22…スリット(計測用パターン)、24…光センサ(光電変換素子)、42…信号処理回路、50…信号処理系、59…空間像計測器(光学特性計測装置の一部)、90…スリット板(パターン形成部材)、100…露光装置、PL…投影光学系、IL…照明光、PM…計測マーク、PM'…空間像、W…ウエハ(基板)、R…レチクル(マスク)、WST…ウエハステージ(基板ステージ)。

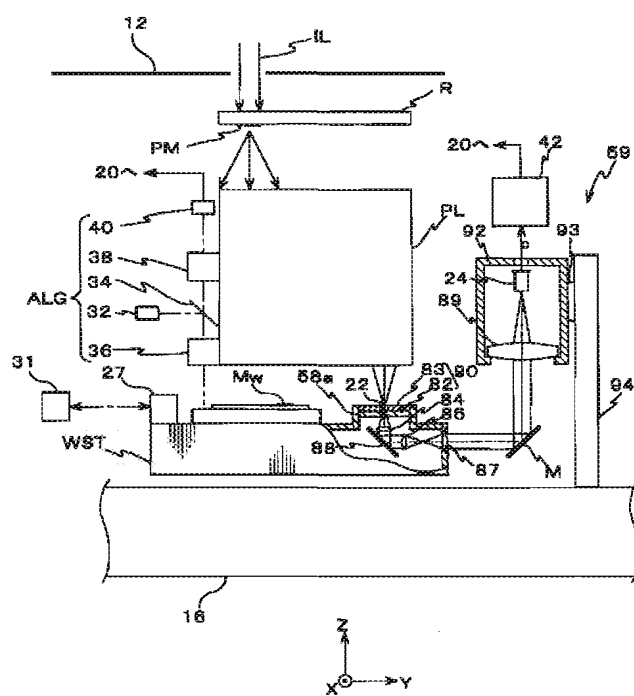
【図8】



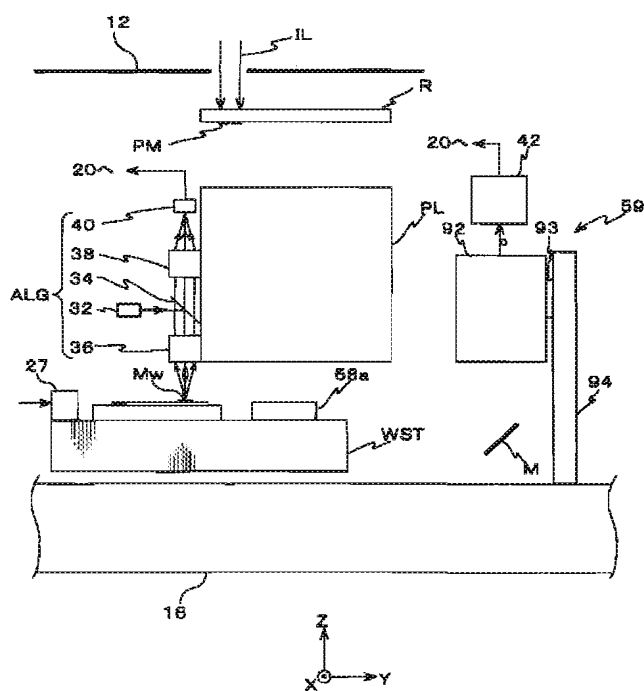
【図1】



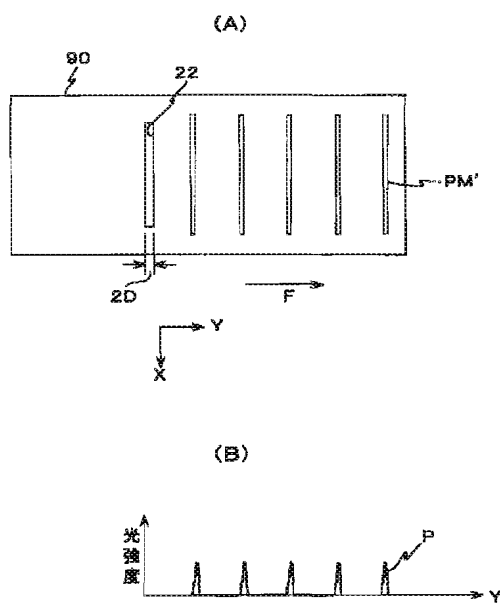
【図2】



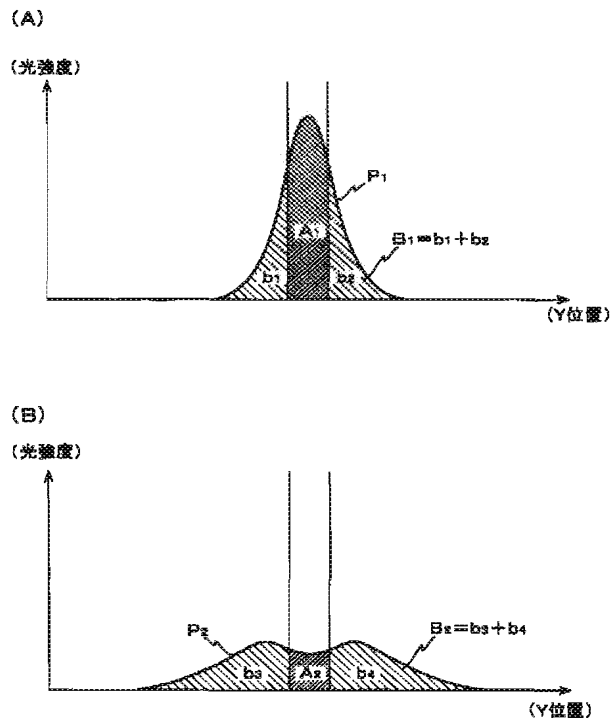
【図3】



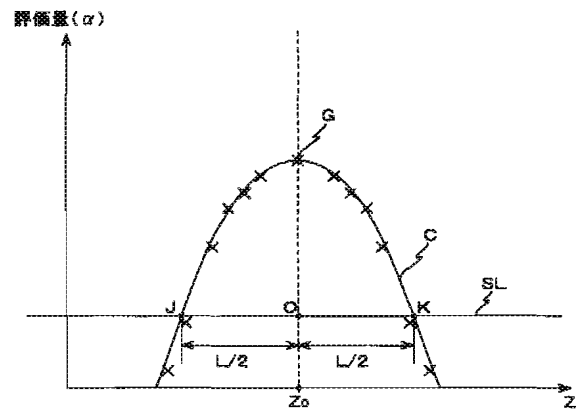
【図4】



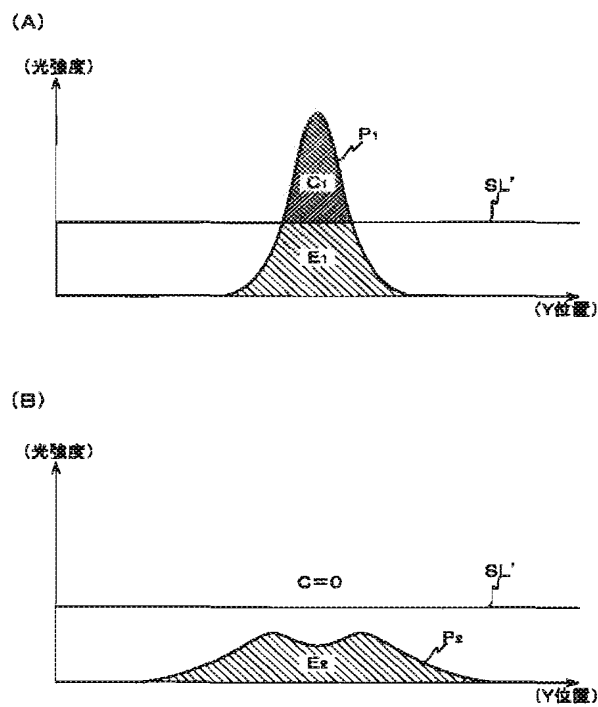
【図5】



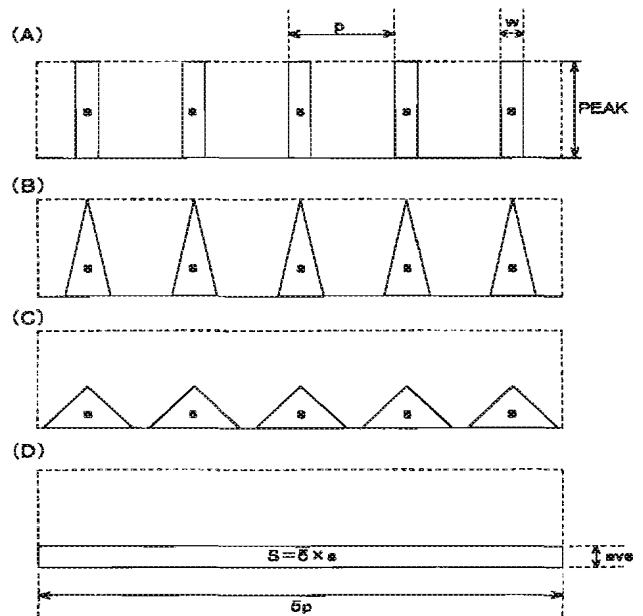
【図6】



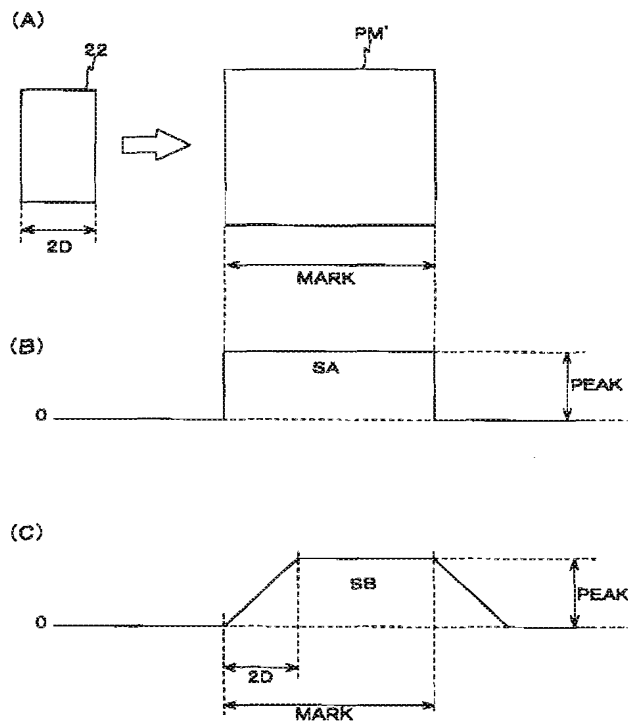
【図7】



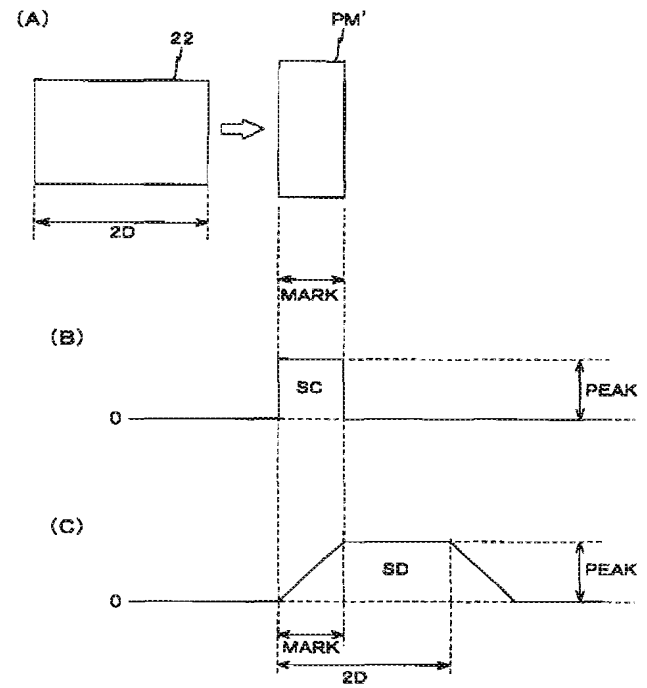
【図9】



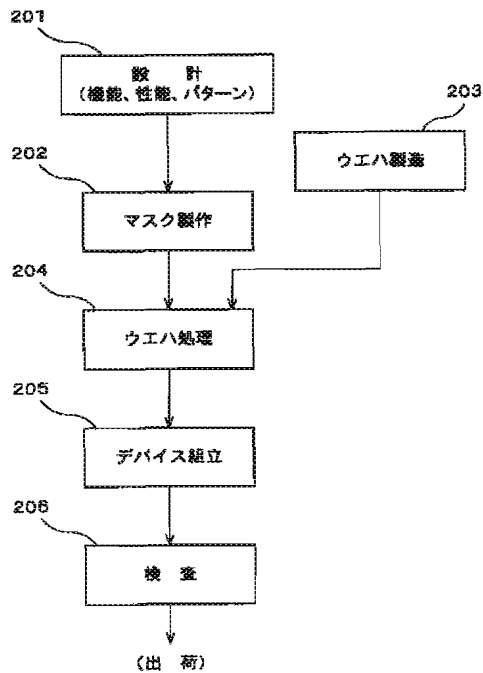
【図10】



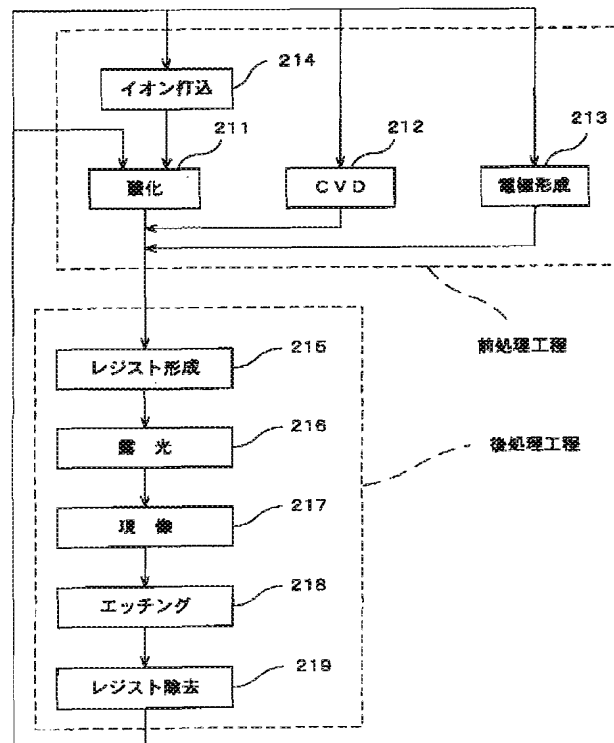
【図11】



【図12】



【図13】



フロントページの続き

(72)発明者 近藤 尚人

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株  
式会社ニコン内

Fターム(参考) 5F046 BA04 BA05 DA14 DB05 EA03  
EA12 EA13 EB03